مبادىء
علم أصوات الكلام الأكوستيكى

بيتر ليدفوجد

ترجمه

الدكتور جلال شمس الدين

راجعه

الدكتور سعد مصلوح

١٩٩٢م

محتويات الكتاب

مقدمة المترجم

سوف نتناول فى هذه المقدمة النقاط الاتية :-

١- علاقة علم أصوات الكلام الاكوستيكى بغيره من العلوم اللغوية ومباحثها.
٢- التعريف بنطاق هذا العلم.
٣- القاء الضوء على أهميته واستخداماته النظرية والعملية.
٤- أسباب ترجمة هذا الكتاب.

أما عن علاقة علم أصوات الكلام الاكوستيكى بغيره من العلوم اللغوية ومباحثها فتأتى من خلال علاقته بعلم الأصوات الكلامية Phonetics اذ ان الدراسات اللغوية تشتمل أساسا على المباحث الآتية :-

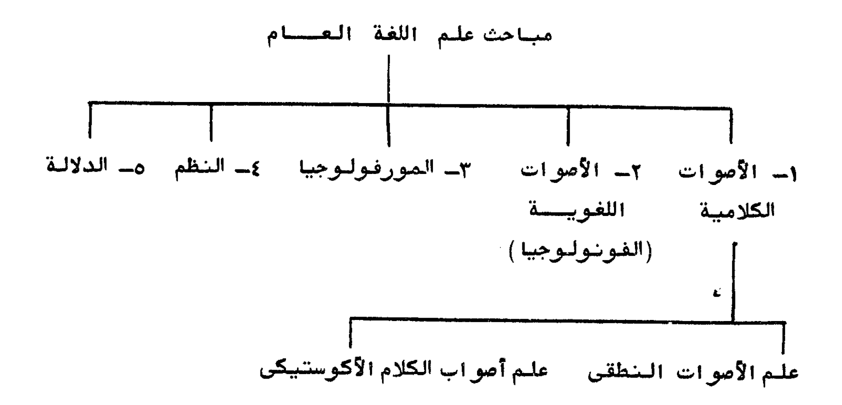
١- الأصوات الكلامية Phonetics .
٢- الأصوات اللغوية الوظيفى أو الفونولوجيا Phonology .
٣- المورفولوجيا Morphology .
٤- النظم Syntax .
٥- الدلالة Semantics .

والذى يهمنا من هذه العلوم والمباحث هو القسم الأول وهو : علم الأصوات الكلامية Phonetics . اذ يقوم هذا العلم على دراسة الصوت الكلامى بعيدا عن الاعتبارات الوظيفية ،وتجرى هذه الدراسة على ثلاثة جوانب : النطق - انتشار الموجات الصوتية فى الهواء - السمع .

بالنسبة " للنطق " فقد نشأ علم الأصوات النطقى الذى عالج هذا الموضوع : articulatory or Physiological Phonetics.

أما بالنسبة لظاهرة انتشار الموجات الصوتية فى الهواء وظاهرة السمع فقد نشأ لمعالجتها "علم الأصوات الكلامية الاكوستيكى

" acoustic phonetics" وهو موضوع هذا الكتاب • وعلى ذلك يتضح لنا أن علم أصوات الكلام الأكوستيكى فرع من علم الأصوات الكلامية :-



وعن النقطة الثانية وهى التعريف بنطاق هذا العلم - أى علم أصوات الكلام الأكوستيكى - فهو يقوم بدراسة التركيب الفيزيائى للأصوات الكلامية ؛ إذ يحلل الاهتزازات الصوتية المنتشرة بوصفها ناتجة عن ذبذبات أو اهتزازات ذرات الهواء فى الجهاز النطقى المصاحبة لحركات أعضاء هذا الجهاز[1]• وهى دراسة موضوعية ، كما يقوم أيضا بدراسة تأثير هذه الاهتزازات على الأذن ،وهى دراسة تشتمل على بعض الجوانب الذاتية •

أما عن النقطة الثالثة وهى أهمية هذا العلم فلقد أحدث علم أصوات الكلام الأكوستيكى ثورة فى الدرس الصوتى ،وذلك بتقديم وسائل جديدة لدراسة الأصوات ووصفها ، وقد استطاعت هذه الوسائل

---

(١) انظر كتاب علم اللغة العام - الأصوات - د• كمال محمد بشر- الطبعة الخامسة ١٩٧٩ دار المعارف ص ١٧ •

أن تقدم العون للدارسين فى صور عديدة أهمها :

- الكشف عن حقائق صوتية لم تكن معروفة لهم من قبل .
- تعديل مناهج الدرس وطرقه ، وتغيير ملحوظ فى آرائهم وانطباعاتهم السابقة عن الأصوات .
- يساعد الباحثين اللغويين على فهم الأساس الفيزيقى لبعض الظواهر اللغوية التى تصاحب النطق مثل النبر والتنغيم التى تبنى على أسس فيزيقية بحتهى : التردد " frequency " والاتساع amplitude والمدة duration .
- تأييد بعض الحقائق التى توصلوا إليها بالطرق التقليدية وتأكيد الآراء المتعلقة بهذه الحقائق .

ولقد جاءت هذه الثورة نتيجة لتطبيق الوسائل الفنية والمبادىء العلمية المتبعة فى علم الفيزياء على الصوت الإنسانى وأصبح علم أصوات الكلام الأكوستيكى يقدم أجلّ الخدمات إلى ميادين أخرى ذات أهمية بالغة فى حياة البشرية من ذلك مثلا :

- هندسة الصوت فى وسائل الاتصال والاذاعة .
- علاج أنواع معينة من الصمم وعيوب النطق .
- النظر فى تغير الأصوات الكلامية وتطورها ولماذا أن بعض الأصوات أكثر ميلا من غيرها إلى التغير وعدم الاستقرار .

- وبتوقع العلماء - بالإضافة إلى ما سبق - أن يقوم علم أصوات الكلام الأكوستيكى بدور أساسى فى إحداث ثورة علمية خطيرة الشأن وهى تحويل الكلام المنطوق إلى كلام مكتوب آليا . ونجاح هذه الخطوة سوف يؤدى بالعكس إلى إمكان تحويل الكلام المكتوب إلى كلام منطوق آليا . ثم يؤدى جميع ذلك إلى خطوة ثالثة وهى أن يصبح الإنسان قادرا على أن يتكلم أمام البوق Microphone بلغة معينة ويحصل فى الحال على ترجمة لهذا الكلام بلغة أخرى مكتوبة أو منطوقة على السواء . ولا يخفى على القارىء خطورة التأثير الحضارى لهذه المخترعات التى

يقوم علم أصوات الكلام الأكوستيكى بدور أساس فيها، ولقد قطعت شوطا بعيدا فى هذا الطريق فعلا.

- ومن مهام هذا العلم أيضا أنه يقدم لنا الأساس العلمى والنظرى لعلم آخر هو علم الأصوات التجريبى الذى يخدم كافة فروع الدراسات الصوتية (٢).

ولعله يتضح الآن للقارى مدى أهمية هذا العلم مما دفع إلى ترجمة هذا الكتاب لكى يسد جانبا فى المكتبة العربية إلى جانب أقرانه من الكتب التى تُرجمت فى هذا العلم، فيسهل على القارىء العربى الاطلاع على هذا العلم بلغته التى يتقنها مما ييسر تلقى حقائقه من جهة كما ييسر القاءه على الطلاب من جهة أخرى باللغة العربية بدلا من اللغة الإنجليزية .

وقد زودت الترجمة بهوامشّ تشرح بعض النقاط التى بدا غموضها، أو تعريفٍ لبعض المصطلحات التى يحسن تذكير القارىء بها .إن كانت قد بعدت عن مجاله الأكاديمى ،أو تفسيرٍ لاختيار ترجمة بعينها لكلمة ما ، وهى جميعا دفعات متواضعة تساعد القارىءعلى التقدم إلى الامام . هذا وحين تأتى الاضافة فى سياق الكلام فقد وضعتها بين قوسين هكذا [ ] حتى تكون مفصلة عن النص الأصلى.

ونظرا لدقة موضوع هذا الكتاب ولأنه سوف يُتَداولُ بين أيدى الباحثين وخاصة المبتدئين منهم ، فقد ارتأيت أن أوفر له مزيدا من الدقة والوضوح وأن يأخذ حظه فى المراجعة فعرضته على أستاذى الدكتور / سعد مصلوح وهو أستاذ متخصص فى هذا العلم، فتفضل

---

(٢) انظر المرجع السابق ص ١٢ وما بعدها حيث أورد الدكتور/ كمال بشر مجالات هذا العلم بالتفصيل .

مشكورا بمراجعته . والحقيقة انه قد بذل فيه مجهودا كبيرا من الناحيتين العلمية والبلاغية فصار بعد المراجعة أكثر دقة وأنصع إبلاغا . فله منى عظيم الشكر وعميق الامتنان.

وأخيرا لا نطلب من الله الا أن يجعل هذا العمل نافعا .

الاسكندرية فى ١٩٩٢ م — المترجم

١٤١٢ هـ — الدكتور / جلال شمس الدين

مقدمة المؤلف

هذا الكتاب يوضح بعض الجوانب الأكوستيكية التى يستفيد منها اللغويون والمشتغلون بها. وهو يفترض أن القارىء ليس على دراية بالفيزيقا أو الرياضيات ولكنه مع ذلك يرغب أن يكون قادرا على تتبع بعض معالجات علم الأصوات الأكوستيكى والتى تَسُودُ فى الصحائف العلمية المتخصصة . ومن ثم يحاول هذا الكتاب أن يزود القارىء بخلفية تمكنه من المعرفة بمثل هذه المعالجات الأكوستيكية ومن تذوق ما يشتمل عليه الكتاب من مبادىء عامة دون أن يرهقه بالكثير من المسائل الفنية الدقيقة، أو بالمادة التى لاتعنيه، على نحو ما نراه عادة فى الكتب الأولية المتخصصة فى علم الفيزياء. ويظهر ذلك جليا فى الطريقة التى عرضنا بها لنظرية الرنين فى هذا الكتاب . حيث اشتملت من الناحية الفنية على نقطة أو نقطتين لم نلتزم فيهما التزاما صارما بالدقة العلمية ليتحقق لنا بذلك غرضنا من التبسيط ، كما إننا لم نُقم وزنا لسرعة الصوت أو لتأثير دوپلر، ولم نعتبر خواص أنابيب الأرغن المغلقة والمفتوحة ، اذ ليس فى هذه الأمور كلها ما يعتمد اعتمادا مباشرا على الجانب الأكوستيكى من الكلام .

وهناك أمران آخران يتحدد بهما مجال هذا الكتاب علينا أن نوردهما هنا :

أولهما : إننا قصدنا بهذا الكتاب أن يكون متنا شارحا للأساسيات التى تقوم عليها نظرية معينة وما كان فى نيتنا أن يكون معالجة شاملة لفيزيقا الكلام، بل إن هذا الكتاب فى حقيقة أمره ليس محاولة لاستقراء جميع الأبحاث الجارية الآن فى مجال علم الأصوات الأكوستيكى .

والثانى : إن الكتاب غير معنى بمسائل استخدام الأجهزة مثل الراسم الطيفى للصوت The sound spectrograph . أما

المسائل الفنية الخاصة بالتحليل الأكوستيكى للكلام فى المعمل فقد أُخذت فى الاعتبار فى الكتاب القادم للمؤلف وهو مدخل لعلم الأصوات التجريبى وعنوانه :

الكلام فى المعمل Speech in the laboratory

فالكتاب الحالى لايغطى الا الأساسيات التى يجب أن تُستوعب قبل أن نتعرض هناك لبعض المسائل الفنية الدقيقة .

وأشكر الكثيرين الذين قرأوا مسودة هذا الكتاب وقدموا ملاحظات قيمة وأخص منهم "ديفيد إيبيركرومبئ David Aebercromby و"إيان كاتفورد" Ian Catford و"مارتن جوس" Martin Joos و"جينى ليدفوجد" Jenney Ladefoged ، و" ر. سيلليتو R.Sillitoe .

(بيتر ليد فوجد)

الموجـــــات الصوتيــة

من الأسباب الرئيسية فى صعوبة دراسة الكلام، أن الأصوات (١) تعبر سريعا ولايمكن الإمساك بها ،فكل كلمة تنعدم بمجرد النطق بها.

---

(١) من أصعب الكلمات استخداما فى علم اللغة حين يعالج بالعربية كلمة " صوت " ،فهذه الكلمة تستخدم بثلاث دلالات فى هذا المجال :

أ- فهى تعنى أولا الصوت على اطلاقه : المسموع وغير المسمـــوع، فمن الأصوات المسموعة صوت الترام أو صوت العاصفة أو صوت شوكـــة رنانة أو صوتنا نحن حين نتحدث ،أما الأصوات غير المسموعة، فهـى تلك التى تمتلك موجة صوتية مفرطة فى كبر ترددها أو مفرطة فـــى صغر هذا التردد بالنسبة لمدى السمع البشرى ،وتسمى جميع الأصـوات السابقة بالانجليزية Sounds غير أن اللغة الانجليزية أفردت صـوت الانسان بتسمية خاصة فأطلقت عليه كلمة Voice. والعلم الـــذى يدرس المسموع فقط من هذه الأصوات جميعا دون تفريق بينها هو علم الأكوستيكا acoustic. وهو أحد علوم الفيزياء .

ب - كما تعنى ثانيا" الصوت الكلامى" وهو صوت مقتطـع مـن الكلمة المنطوقة فعلا بجهاز النطق البشرى مثل صوت السين فى كلمة مثل : " سار " ويعبر عنه هكذا : الصوت [س] . ومثل صوت الميـــم فى كلمة " جمل "ويعبر عنه هكذا : الصوت [م] ويسمى بالانجليزيـة Speech sound . والعلم الذى يدرس هذه الأصوات من الناحيـة اللغوية هو علم " أصوات الكلام" Phonetics . أما العلم الـــذى يدرسها من الناحية الفيزيائية فهو " علم أصوات الكلام الفيزيائـى" acoustic phonetics . وهو علم مشترك بين اللغة والفيزياء، وهو موضوع هذا الكتاب . ولقد ارتأيت أن أترجم عنوان الكتـــاب " بعلم أصوات الكلام الأكوستيكى" تيسيرا لاستخدام هذه المصطلحـــات فيما بعد . =

صحيح أنه يمكن استرجاع الأصوات إما بتكرار الكلمات وإما باستخدام

= ج ـ كما تعنى ثالثا الصوت اللغوى كوحدة صوتية فى لغة ما وهو الفونيم phonemeمثل فونيم السين ويعبر عنه هكذا: الوحدة الصوتية أو الفونيم/س/ ، وفونيم الميم ويعبرعنه هكذا: الوحدة الصوتية أو الفونيم /م/ . وأما الحرف Letter فهو الرمز الكتابى للفونيم . ويعبر عن حرف السين مثلا بالرمز س ، وحرف الميم بالرمز م دون إحاطته بخطوط مائلة أو أقواس . والعلم الذى يدرس الفونيم هو " الفونولوجيا" وهو أحد فروع علم اللغة .

والمعنى الأول والثانى هما المستخدمان فى هذا الكتاب ... ويستطيع القارئ بشىء من التدقيق التفرقة بينهما من خلال سياق الكلام والرسم التالى يبين مختصرا للتقسيمات السابقة :



أجهزة التسجيل مثل الجراموفون . ولكن الذى ينتج من كلتا هاتين الحالين هو " حدث " آخر . إنه نسخة من الصوت الأصلى وليس الصوت نفسه .

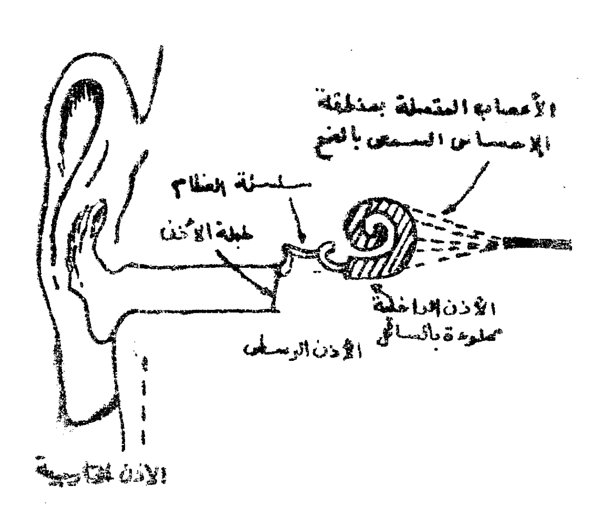
وحتى أثناء الوجود الوجيز للصوت ،نجد أن من الصعب فحصه إلى درجة بعيدة . فلا شىء هناك يمكن أن يُرى ،وليس ثمة رباط منظور بين متكلم ومستمع . هناك فقط الهواء المحيط ،ولكن من الطبيعى انه ليس فى الامكان رؤية أية تغيرات فى الحال التى يكون عليها الهواء عند قيامه بتوصيل صوت ما .

ولهذه الصعوبات ربما يكون من الأفضل أن نبدأ دراستنا للصوت بفحص مختصر للأذن الإنسانية . وبهذه الطريقة فإننا نبدأ دراستنا بشىء ملموس tangible لأننا نعلم أن الأذن هى عضو السمع ،وبالرغم من أن معرفتنا بالآلية mechanism الدقيقة التى تعمل الأذن بها مازال يكتنفها شىء من عدم اليقين،لكننا مع ذلك يمكن أن نوضح عددا من الحقائق عن الصوت Sound باللجوء إلى نظرية مبسطة .

الشكل رقم (١ - ١) هو رسم توضيحى للملامح الأساسية للأذن ، وأول ما يُلاحَظ فيها من أقسام هو طبلة الأذن ear drum وهى غشاء رقيق يقع على بعد بوصة تقريبا داخل الأنبوب الضيق - أو ممر السمع - الذى يبدأ من الأذن الخارجية وينتهى عند الطبلة ،فحينما يندفع الهواء داخل الممر السمعى auditory passage تشرع طبلة الأذن فى التحرك معه . وبالمثل فإنها تتحرك راجعةً حينما يتحرك الهواء بعيدا . ويتصل بطبلة الأذن سلسلة من العظام وظيفتها هو نقل حركات طبلة الأذن للسائل الموجود فى الأذن الداخلية . ومن خلال عمل سلسلة العظام فان الاهتزازات التى تقوم بها طبلة الأذن إلى الأمام وإلى الخلف تسبب اهتزاز السائل ، ثم تؤدى الأعصاب المرتبطة ارتباطا وثيقا بهذا السائل إلى توصيل هذه الاهتزازات إلى المنطقة الحساسة بالمخ الخاصة بحاسة السمع .

لحركات السائل تثير هذه الأعصاب فتتحقق تجربة الإحساس السمعى.

ومن مجموع هذه الحقائق ،نستطيع القول بأن أى صوت ما هــو إلا إثارة للهواء تستطيع أن تتسببَ فى تحريك طبلة الأذن والتى تنقــل بدورها هذه الاهتزازة إلى السائل الموجود بالأذن الداخليــــة inner ear عن طريق سلسلة العظام بطريقة تؤثر فـــى الأعصاب السمعية auditory nerves (٢) . ودراستنا لطبيعة " الصوت" سوف تهتم – بدرجة كبيرة – بفحص الإشارات التى تحدث فى الهــواء والتى تسبب حدوث هذه العملية .



شكل (١ – ١) رسم تخطيطى لآليــــة الأذن

---

(٢) هذا الكلام صادق فقط على ما يقع فى مجال السمع من أصوات وليس على اطلاقه ، كما سبق أن ذكرنا. (المترجم) .

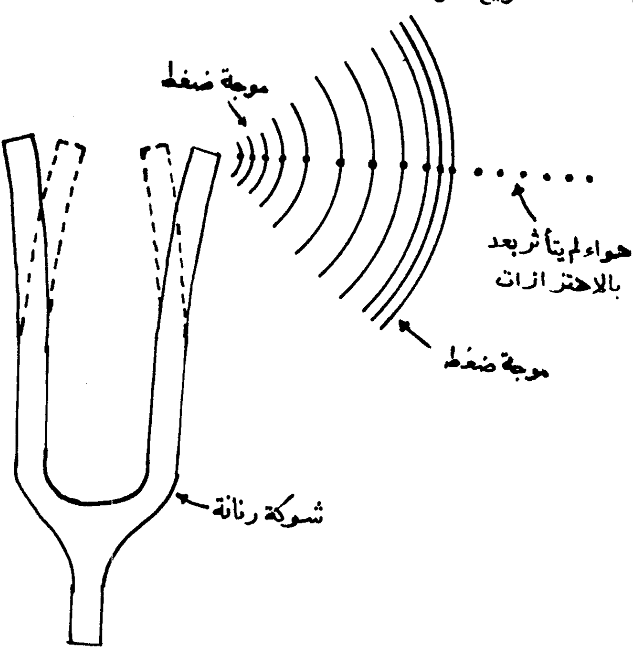
واذا رجعنا الآن لنأخذ فى الاعتبار مصادر الأصوات المختلفة ، فإننا نجد فى كل حالة شكلا ما من أشكال الحركة كامنا فى هذه الأسباب . وعلى ذلك فإن الضوضاء تحدث حينما يهوى كتاب ويصطدم بالأرض ، والبيان والقيثارة لهما أوتار تهتز،ومعظم أصوات الكلام تسببها حركة الهواء من الرئتين ،فهذه الحركات هى التى تتسبب فى إثارة الهواء المحيط .

والإثارات على أى حال - لا تحدث لحظيا خلال مجموع الهواء المحيط بمصدر الصوت ، بل تنتشر بعيدا مثل الموجات التى تحدث فى بركة صغيرة بحيث يُوجَد بالضرورة تأخير ضئيل منذ اللحظة التى تبدأ فيها الحركة الأصلية فى إنشاء الإثارة الأولى للهواء إلى اللحظة التى تصل فيها هذه الإثارة إلى آذاننا . والصوت ينتقل بسرعة كبيرة ،ولذلك يبدو لنا حين نلاحظ شخصا يتحدث أننا نسمع الأصوات فى لحظة رؤيتنا للحركات المسببة لها ،ولكن هذه الأصوات فى الحقيقة تستغرق وقتا ضئيلا فى وصولها ،وكلنا يعلم أنه حين يكون مصدر الصوت بعيدا - كالبندقية مثلا - يُرى وميض الانفجار عادة قبل سماع صوت الانفجار بوقت ملموس .

ومن المناسب لتفسير هذه الظاهرة أن نتصور الهواء الواقع بين آذاننا وبين مصدر الصوت كما لو كان مقسما إلى عدد من الجزيئات، وأن مصدر الصوت يسبب حركة جزيئات الهواء فى الحيز الملاصق لها ،وهذه الحركة تسبب الإثارة disturbance فى الهواء فى مسافة أبعد قليلا من مصدر الصوت . وجزيئات الهواء هذه بدورها تؤثر على ما يجاورها من الجزيئات التى ماتزال بعيدة عن مصدر الصوت . وبذلك تنتشر الإثارة إلى مسافة بعيدة .

ويمكننا أن نبدأ دراستنا التفصيلية لإنتاج الصوت بأن ننظر إلى النغمة الصادرة من شوكة رنانة tuning fork. فإذا نظرت مدققا لشوكة رنانة وهى تنتج الصوت ،فإنك تستطيع أن ترى

طرفى ذراعى الشوكة رؤيةً غير واضحة المعالم إلى حد ما وذلــك لأنهما يهتزان بسرعة من جانب إلى آخر . هذه الحركة والتى تظهــر بشىء من المبالغة فى الشكل (١ - ٢) تُوجِّه سلسلة من الضربــات للهواء الملاصق . ويمثل الشكل السابق اللحظة التى تَحرَّك فيهــــا الذراع الأيمن للشوكة إلى أقصى ما يمكن تجاه اليمين. فى هـــذه اللحظة يكون جزيئى الهواء الملاصق تماما للشوكة قد تحرك ليصبح الآن أكثر قربا لجزيئات الهواء المجاورة. وحينما تصبح جزيئات الهواء أكثر اقترابا من بعضها ينضغط الهواء. وأما حينما تبتعــــد الجزيئات بعضها عن بعض أكثر من المعتاد،ينتج ما يسمى بمنطقــة التخلخل rarefaction. وبعد لحظة أخرى ،حينما يندفع طرفــا الشوكة تجاه بعضهما مرة أخرى ،فإن الهواء سوف ينسحب إلى الخلــف لتتكون منطقة تفريغ أو تخلخل بجوار الشوكة.



شكل (١ - ٢) رسم توضيحى لتمثيل تغيرات ضغط الهواء الذى تسببه اهتزاز شوكــة رنانــة .

وهكذا تهتز الشوكة ؛ وبينما هى تهتز ينضغط الهواء الملاصق لها ويتخلخل بالتوالى .وهذه الإشارة للهواء الملاصق للشوكة سوف تؤثر بدورها على جزيئات الهواء الأبعد قليلا ،وتنتشر الإزاحات displace-ments الصغيرة للهواء بعيدا كما هو مبين بالشكل ،وحينما تصل إلى أذن المستمع ، تحمل طبلة الأذن على التحرك وينتج عن ذلك سماعها كصوت .

ولكى نحصل على صورة أكثر وضوحا لسلوك الهواء ،يمكننا أن ندرس الحركة لعدد محدود من جزيئاته . فالشكل (١ - ٣)يمثل حركة ١٣ جزيئا (بطريقة مبسطة إلى حد ما) . وكل سطر فى الشكل يبين أوضاع هذه الجزيئات بعد فترة قصيرة من تلك التى يمثلها السطر السابق . فالسطر رقم ٦ على سبيل المثال يمثل ما طرأ على المواقع المفترضة للثلاثة عشر جزيئا من تغيير بعد أن كانت فى الوضع الممثل بالسطر رقم ٥، وتظهر الجزيئات الساكنة فى هذا الشكل على هيئة خط قصير (-) ، أما الجزيئ المتحرك فإنه يُمَثَّل بسهم. وسرعة هذه الحركة يمثلها عرض هذا السهم. ويمكن رؤية أوضاع الشوكة الرنانة طبقا للزمن المناظر لها على يسار الشكل .

ومن المهم أن نلاحظ أن الشكل (١ - ٣) هو نوع من الرسوم البيانية التوضيحية ، وليس صورة تخطيطية لحدث ما مثل الشكل (١ - ٢) . إنه لايمثل ما يحدث لمجموع الهواء عندما تتحرك الشوكة الرنانة . وإنما يمثل ثلاثة عشر جزيئا. ويمكن رؤية المواقع التابعة لها فى سطور متتالية . ولأن كل سطر يمثل لحظة فى وقت لاحق لوقت السطر الذى فوقه ، فإن علينا عند فحص هذا الشكل أن نفحص سطرا واحدا فى كل مرة . لذلك فمن الأفضل أن نبدأ بوضع قطعة من الورق على الشكل بحيث لايتضح لنا سوى السطر الأعلى فقط ..... وحينما تُحرّكُ الورقة على الصفحة إلى أسفل ،ستبدو مناطق الضغط والتخلخل وكأنها تتحرك تجاه اليمين بالرغم من أن جزيئات الهواء المنفردة لاتتحرك إلا حركة إلى الأمام وإلى الخلف .

وتعرف هذه الظاهرة "بالموجة" Wave إنها صورة نمطية من حركة موجية ينبغى فيها على الطاقة energy (٣)- التى تظهر على صورة مناطق من التضاغط والتخلخل- أن تنتقل لمسافة محسوسة خلال وسط مثل الهواء، بالرغم من أن كل جزء من مفردات الأجزاء فى هذا الوسط لا يتحرك عن وضعه إلا حركة ضئيلة.

ولكى نفهم الكيفية التى تنقل بها الحركة الموجية wave motion فهما دقيقا، علينا أن نُجرى اختبارا أكثر تفصيلا للشكل رقم (١ - ٣). فحينما نفحص هذا الشكل سطرا سطرا سوف نرى فى السطر الأول أن طرفى الشوكة يتحركان بسرعة تجاه الخارج من وضع السكون الذى كانتا فيه. وأن كل الجزيئات ساكنة فيما عدا الجزيئ الأول الذى يتحرك فى توافق مع الشوكة الرنانة. وفى السطر الثانى والذى يمثل

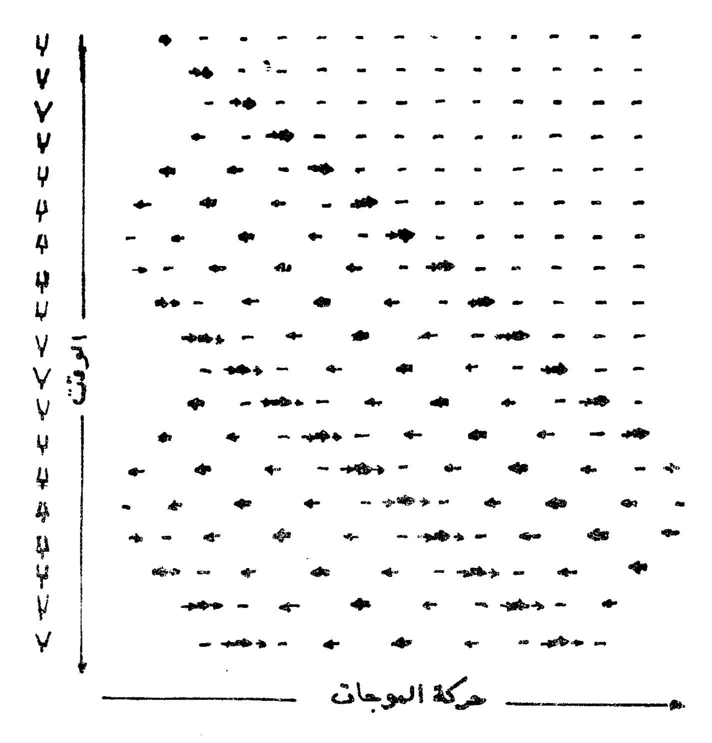
---

(٣) تنقسم الطاقة إلى نوعين، طاقة وضع وطاقة حركة :-
طاقة الوضع: حينما نرفع جسما إلى أعلى فانه يكتسب طاقة وضع تتناسب مع المسافة التى ارتفع اليها. فكلما زاد ارتفاع الجسم زادت طاقة وضعه ، وحينما نضغط كمية من الغاز فى حيز مغلق فإنها تكتسب أيضا طاقة وضع تتناسب مع الضغط الذى وقع عليها. فكلما زاد الضغط كلما زادت طاقة الوضع.

طاقة الحركة : ويكتسبها الجسم حينما يتحرك بسرعة ما. وهى تتناسب مع مربع هذه السرعة. فكلما زادت سرعة الجسم زادت طاقة حركته.

والذى يحدث أثناء الكلام أن طاقة الوضع التى نشأت من تضاغط الهواء تتحول إلى طاقة حركة بتحريك جزيئات الهواء.

(المترجم)



شكل (١ - ٣) يبين انتشار موجة صوتية ،كل سطر يبين وضع ثلاثة عشر جزيئا من الهواء فى لحظة من الوقت متأخر قليلا عن وقت السطر الأعلى .

والجزيئات الساكنة stationary ممثلة بخط قصير،والجزيئات المتحركة ممثلة بأسهم. ودرجة سمك السهم تمثل سرعة الحركة [أى كلما كان السهم عريضا كانت الحركة أسرع]. والأوضاع المتوقعة للشوكة الرنانة التى يمكنها أن تنتج هذه الحركات تُرى على اليسار(القراء المتخصصون والذين لم يوضع هذا الكتاب من أجلهم ،سوف يلاحظون أن جبهة الموجة قد حُوِّرت قليلا بغرض التبسيط،فقد افترض أن الموجة سوف تبدأ بالسعة القصوى).

الحالة فى لحظة لاحقة ، يبطىء الجزيىء الأول قليلا بعد أن اصطدم بالجزيىء الثانى الذى يتحرك الآن بسرعة . وفى السطر الثالث (بعد لحظة لاحقة أيضا) يصير الجزيىء الأول إلى وضع السكون ، ويأخذ الجزيىء الثانى فى التباطؤ بعد أن تسبب فى بث الحركة فى الجزيىء الثالث . وفى السطر الرابع يواصل الجزيىء الثالث حركته للخارج ويحمل الجزيىء الرابع على أن يبدأ فى الحركة على حين يتوقف الجزيئى الثانى ويتحرك الجزيئى الأول عائدا تجاه الشوكة الرنانة والتى يتحرك كلا طرفيها الآن تجاه الطرف الآخر. إن كل جزيىء من جزيئات الهواء إنما يسلك سلوك الثقل bob المعلق بحبل البندول. ذلك إنك إذا أعطيت البندول دفعة ليتحرك من إحدى جهتيه فإنه سوف يتحرك مسافة معينة ،وحينئذ يبدأ فى تأرجحه عائدا إلى الجهة الأخرى مارا بوضع السكون. وكذلك الحال مع كل جزيئى من جزيئات الهواء ،فهو يشبه البندول الذى اكتسب دفعة من الجزيئى التالى له . أما الجزيىء السابع فيبدأ الحركة بتأثير الجزيئى السادس والذى اكتسب حركته بدوره من الدفعة التى أعطيت له من الجزيئىء الخامس .... وهكذا .

وبهذه الطريقة تنتقل الحركة الاهتزازية خلال الهواء،وتتحرك الجزيئات الحرة إلى الخلف وإلى الأمام ، بينماتتحرك موجات التضاغط بثبات إلى الخارج ، وبالتالى فإن أذن السامع سوف تخبُرُ لحظاتٍ من الضغط العالى متلوة بلحظات ذات ضغط أدنى ،وسيؤثر هذا على طبلة الأذن بالطريقة التى ذكرناها سابقا ليوجد الإحساس بالصوت .

وليست كل التغيرات الحادثة فى ضغط الهواء يمكن إدراكها كأصوات ؛ فنحن نستطيع على سبيل المثال أن نصنع بمروحة حركة للهواء مصحوبة بموجة من الضغط يمكن الإحساس بها ولكنها لاتُسمع . وفى هذه الحالة-بالتأكيد - إشارةٌ للهواء . ولكن هذا النوع من التغيير فى ضغط الهواء لايمكن للأذن أن تحس به ، لأن التغيرات السريعة لضغط الهواء هى وحدها التى تؤثر على الأذن بطريقة تجعل الأصوات مُدْرَكَةً لها .

وأى شىء يسبب تغيرا ملائما فى ضغط الهواء هو مصدر source للصوت ،وهذه التغيرات فى ضغط الهواء ترجع - كما رأينا - إلى حركات صغيرة ولكنها متكررة لجزيئات الهواء ٠ وقد حدث كل ذلك لأن مصدر الصوت يُحدِثُ حركات متماثلة.وتكون الحركات عادة سريعة جدا إلى حد بعيد حتى إنها لاتُرى بالعين. ولكنك لو وضعت أصبعك برفق على شوكة رنانة أثناء إنتاجها للصوت ،فإنك غالبا ستشعر بالاهتزازات ،ولكن من المحتمل أن يتسبب ضغط اصبعك فى وقف الحركة ٠ وعندئذ يتوقف الصوت ٠ ويمكن بالطريقة نفسها وقف رنين الكأس بوضع اليد عليه وبذلك توقف اهتزازات الزجاج ٠وكلٌ من الكأس والشوكة الرنانة هما مصدران للصوت ،فقط حينما يهتزان ٠

ثمة مصدر للصوت بسيط نسبيا وهو الوتر المشدود،فحين يُجذَبُ هذا الوتر أو يدفع إلى أحد جانبيه ثم يُترك فإنه ينجذب عائدا بشدة مارا بوضعه الأصلى ثم متخطيا إياه ثم يبدأ فى الاهتزاز. وهذه هى أساسيات الآلات الموسيقية مثل الهارب harp والقيثارة والكمان ٠ والبيان piano يستخدم أيضا أوتارا أو أسلاكا مشدودة ولكنها فى هذه الحالة تُطرق بمطارقَ صغيرةٍ بدلا من جذبها أو سحبها إلى أحد جوانبها.

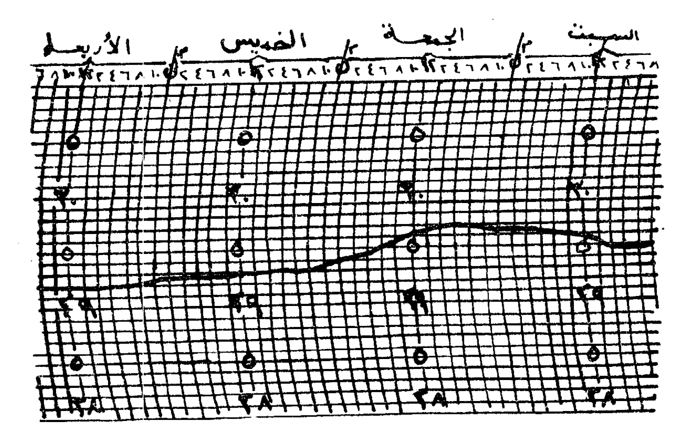
وبعض مصادر الصوت لاتُحدثُ مثل هذه الاهتزازات المنتظمة للهواء. فحينما يسقط كتاب على الأرض ويصطدم بها فلدنيا " الضجيج" nois بالرغم من عدم وجود شىء شبيه بوتر مشدود أو شوكة رنانة مهتزة ٠ فالصوت يحدث من جهة بسبب التضاغط المفاجىء للهواء الموجود تحت الكتاب ، وثانيا للحركات المتنوعة غير المنتظمة التى تنشأ فى كل من الكتاب والأرض ٠

ومصدر الصوت الذى يعنينا فى المقام الأول هو الصوت الإنسانى. وتحدث تغيرات الضغط الجوى فى هذا النوع من الأصوات بوسائل متعددة ٠ وأهم هذه الوسائل هو الفتح والاغلاق السريع للوترين

الصوتيين ،ففى كل مرة يُغلَقُ فيها الوتران الصوتيان ينشأ الضغط ثم يتلاشى فجأة حينما ينفرجان . وهكذا يسبب الفتح السريع والاغلاق السريع للوترين الصوتيين سلسلة من التغيرات الحادة فى الضغط الجوى . وسوف نرى فيما بعد(فى الفصل السابع) أن هذه التغيرات فى الضغط الجوى تؤثر على الهواء فى الحلق والفم بطريقة ينتج عنها وجود الصوت الكلامى.

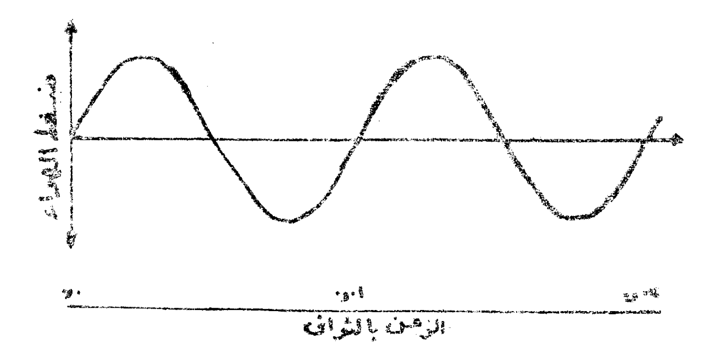
الرسوم البيانية :

سيكون من المفيد لنا فى دراستنا للأصوات ايجاد وسائل لتمثيلها كأشكال مرئية . وهذه الضرورة تقودنا لمعالجة مبادىء الرسومات البيانية على وجه الاختصار. فلقد كنا فيماسبق نصف الأصوات بدلالة حركات جزيئات الهواء ،وأيضا بدلالة التغيرات فى ضغط الهواء . بيد أن مشكلتنا هى تمثيل هذه الحركات والضغوط بطريقة مناسبة .



الشكل (١-٤) مثال لشريط تسجيل الباروجراف الذى يوضح يوما بيوم التغيرات فى ضغط الهواء atmospheric pressure [الرمز لم معناه منتصف الليل]

ثمة طريقة معروفة لتسجيل الضغط الجوى بواسطة البارومتر ، وهذه الطريقة بطبيعتها غير مناسبة لقياس التغيرات الضئيلة والسريعة فى ضغط الهواء التى تصاحب الأصوات . ولكنها تعطينا مؤشرًا لنوع الرسم البيانى diagram الذى يمكننا أن نصطنعه . والباروجراف وهو نوع من البارومتر ذو مؤشر يلامس صحيفة من الورق مثبتة على اسطوانة تدور ببطء ، يعطينا سجلا كالمبين فى الشكل (١ - ٤) . وتظهر التغيرات فى ضغط الهواء هنا على أحد الاتجاهين [وهو المحور الرأسى] . وأما الأوقات التى تحدث فيها هذه الضغوط فستظهر على الاتجاه الآخر [وهو المحور الأفقى] . ويمكننا بمثل هذه الطريقة وبالاستعانة بمكبر للصوت وهو آلة كهربائية حساسة للتغيرات البسيطة فى ضغط الهواء مع ربطه بأدوات التسجيل الكهربائية الأخرى ، أن ننتج رسما للتغيرات فى الهواء التى تحدث أثناء رنين شوكة رنانة كما فى الشكل (١ - ٥) .



(شكل ١ - ٥) التغيرات فى الضغط أثناء الرنين الصادر عن شوكة رنانة .

وتحدث التغيرات فى الضغط فى هذه الحالة بسرعات عالية جدا . فيتزايد الضغط تدريجيا إلى نهاية عظمى maximum ثم يتناقص

بانتظام إلى نهاية صغرى minimum قبل أن يتزايد مرة أخرى لكى يكرر الدورة cycle ،وكل ذلك يحدث فى جزء من الثانية . وارتفاع أى نقطة فى المنحنى Curve فوق خط الصفر تمثل الزيادة فى ضغط الهواء فى ذلك الوقت . والنقاط التى تحت خط الصفر تدل على ضغوط الهواء التى تحت المستوى العادى لضغط الهواء المحيط بالتجربة (٤) .

ومن رسم بيانى مثل شكل (١ ـ ٥) نستطيع أن نرى أولا : الحد الذى تصل إليه النهاية العظمى للزيادة فى ضغط الهواء،وثانيا : المعدل الذى تحدث فيه قمم النهاية العظمى للضغط maximum , peaks (فى هذه الحالة : واحدة فى كل $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية) ، وثالثا : الطريقة التى ينشأ بها الضغط ثم يتناقص .

وما دامت هذه هى أهم مظاهر الموجة الصوتية ،فإن الشكل (١ ـ ٥) يكون مفيدا لنا كرسم بيانى للصوت .

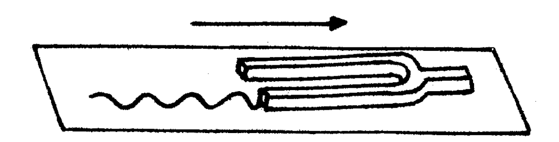
وترتبط التغيرات فى ضغط الهواء ارتباطا مباشرا بحركات جزيئات الهواء فتنشأ قمم الضغط حينما تتقارب هذه الجزيئات، أما لحظات الضغط المنخفض فتنشأ حينما يبتعد بعضها عن بعض، ومن هنا يمكننا أن نمثل الصوت بطريقة أخرى ،وذلك بأن نسجل بيانيا حركات جزيئات الهواء هذه . وقد سبق لنا أن ذكرنا أن الحركة التى

---

(٤) يقدر ضغط الهواء فى الحالات العادية بما يتساوى مع ثقل عمود من الزئبق ارتفاعه ٧٦ سم ومقطعه ١ سم٢ . ومع ذلك يعتبر هذا الضغط مساويا للصفر فى التجارب الصوتية على اعتبار أن التغير الذى يحدث فى ضغط الهواء نتيجة للكلام سواء بالزيادة أو بالنقصان يكون منسوبا لضغط الهواء المحيط بالتجربة . أى ضغط الهواء العادى .

(المترجم)

يقوم بها الطرف الأقصى لأحد ذراعى الشوكة الرنانة ،تتناظر مع حركة جزيئات الهواء المجاورة . وحينئذ يكون من أسهل الأمور أن نحول حركة شوكة رنانة إلى رسم مرئى بأن نثبت سنا حادا بأحد ذراعى الشوكة ثم نسحب الشوكة المهتزة فوق صحيفة من الورق بسرعة منتظمة . (شكل ١ - ٦) .

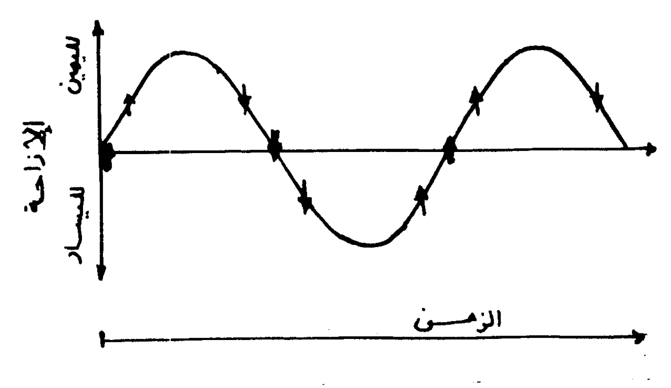


شكل (١ - ٦) شوكة رنانة تتحرك فوق صحيفة من الورق توضح اهتزازات أحد ذراعى الشوكة (مع بعض المبالغة فى التكبير).

وهناك طريقة أفضل من الناحية العملية لإجراء هذه التجربة ، وهو أن نسمح للشوكة الرنانة المهتزة بأن تبقى ثابتة فوق صحيفة من ورق الكربون ملفوفة حول اسطوانة drum تدور بسرعة ثابتة. غير أن الناتج فى كلا الحالين سيكون منحنى من النوع الذى عرضناه .

واذا ألقينا الآن نظرة أخرى على الشكل (١ - ٣) سنرى كيف يمكننا أن نرسم منحنى يماثل فى شكله المنحنيات السابقة وذلك بتتبع حركة جزيئ واحد من جزيئات الهواء ،فهذا الشكل يحدد لنا موقع كل جزيئ على فواصل زمنية منتظمة . وينشأ عن ذلك أننا

إذا رسمنا منحنى من خلال تتبع المواقع التى يحتلها أى جزيىء من جزيئات الهواء فسيتضح لنا إلى أى مدى (وفى أى وقت على وجه التحديد) يتحرك الجزيىء من موقعه فى حالة السكون،وهذه واحدة من أكثر الطرق شيوعا لتمثيل صوت ما . ويُرى فى الشكل رقم (١ - ٧) مثال لاستخدام الأسهم الموجودة فى الشكل رقم (١- ٣)، ولكن مع وجود مقياس أفقى للزمن time scale ، فحينما يكون المنحنى فوق الخط [الذى يمثل الضغط العادى للهواء centre line] فإن هذا يعنى أن الجزيىء - فى هذا الوقت - قد أزيح من وضع السكون بعيدا عن مصدر الصوت ، أى الى اليمين فى الشكل (١ - ٣) ؛ وحينما يكون المنحنى أسفل الخط فإن ذلك يعنى أن الجزيىء قد أزيح تجاه المصدر (أى تجاه اليسار) .وينبغى أيضا أن نلاحظ أن الجزيئات ثابتة للحظة راحة قصيرة عند موقع أقصى إزاحة لها . وأنها تتحرك بأقصى سرعة لها أثناء تخطيها لموقعها الأصلى .



شكل (١ - ٧) يوضح حركة جزيىء هوائى أثناء رنين شوكة رنانة

ويمكن القول على وجه الإجمال إننا سننظر إلى الأصوات فى هذا الكتاب على إنها تغيرات فى ضغط الهواء ؛ ومن ثم يكون أكثر الرسومات البيانية إفادة هو ذلك الذى يبين لنا كيف يتغير ضغط الهواء خلال فترة من الزمن (مثل الشكل ١- ٥)٠ويجب أن نتذكر - على أى حال - أنه من الممكن أن نرسم رسما بيانيا لنفس الظواهر بأن نوضح حركة جزيىء منفرد كما فى الشكل (١ - ٧) ٠

وهذان النمطان من الرسومات البيانية هما ببساطة طريقتان مختلفتان للنظر إلى الحدث نفسه ٠

الفصل الثانى

العلو والدرجة

إذا أصغيت إلى عدد من النغمات الموسيقية كالنغمات الصادرة من الشوكة الرنانة والبيان والكمان ، فسوف تجد من الممكن أن تختلف هذه النغمات بعضها عن بعض من ثلاث وجهات رئيسية . أولاها أن تكون إحداها أعلى من الأخرى ، فإنك إذا طرقت شوكتين رنانتين متشابهتين إحداها برفق والأخرى بشىء من الشدة ،فسوف يكون الفرق الوحيد تقريبا بين الصوتين الناتجين هو أن أحدهما خفى soft ويمكن سماعه بصعوبة ، بينما الآخر عال ويمكن سماعه من مسافة بعيدة . والفرق الثانى المحتمل وجوده بين صوتين موسيقيين أن يكون أحدهما أكثر ارتفاعا فى الدرجة higher inpitch من الآخر .وهذا هو الفرق الأساسى بين نغمتين كما فى نغمة " سى" المتوسطة ونغمة " سى" التى تليها على سلم البيان.فمن الممكن أن نطرقهما لكى تعطيانا صوتين متساويين فى العلو ،ولكنهما يختلفان من حيث كونهما صوتين لأن إحداهما أكثر ارتفاعا على سلم آلة البيان من الأخرى . وأخيرا قد يكون الفرق الثالث بين الصوتين الموسيقيين ناشئا من اختلاف أحدهما عن الآخر فى النوعية quality،وهو الفرق بين نغمتين متساويتين فى الدرجة pitch والعلو loudness، ولكنهما قد أحدثتا بآلتين مختلفتين مثل البيان والكمان .

فهذه العوامل الثلاثة : العلو والدرجة والنوعية، تعطينا أكثر الطرق ملاءمة للتمييز بين جميع الأصوات ،إذ يمكن النظر إليها كثلاثة جوانب تتمايز الأصوات من خلالها. وأنّى سمعت صوتين فمن الممكن أن تصف الفوارق بينهما بالمقارنة من خلال هذه الطرق الثلاثة، ومثال ذلك أن أى شوكة رنانة وأرغن سوف يصدران

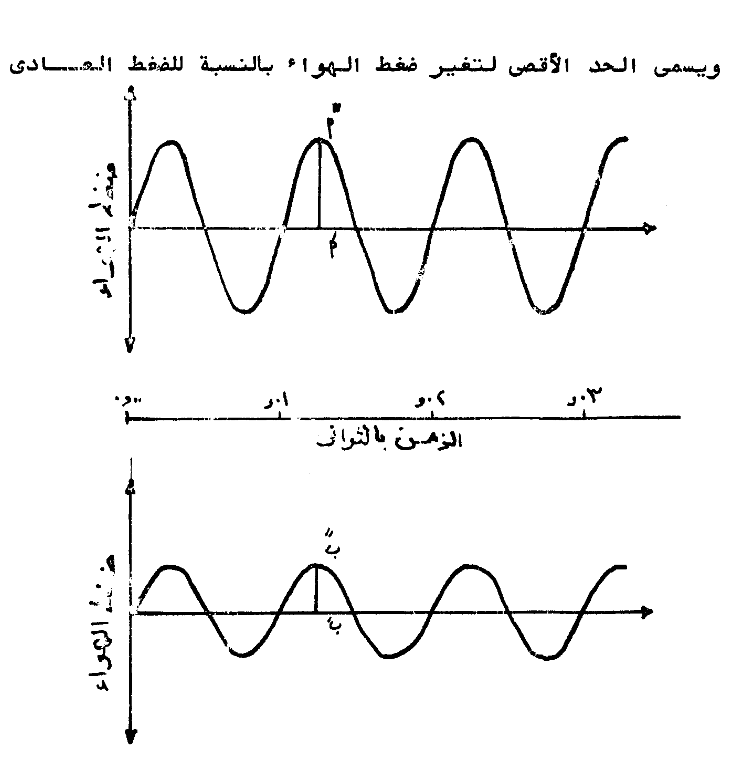
أصواتا نسمعها تختلف على الأقل فى ناحيتين من هذه النواحـــى؟ فالأصوات التى يصدرانها قد تكون لها نفس الدرجة pitch ،ولكن أحدهما يميل لأن يكون أعظم اتساعا من الآخر،وكل صوت له بالتأكيد نوعيته الخاصة به. ولكنك حين تسمع الكلمتين bed - bad فربما يكون المتكلم قد نطق بهما بنفس الدرجة pitch كما قد تكونـــان متساويتين فى العلو ،وحينئذ فهما لايختلفان إلا فى جانب واحد وهو النوعية. وأحد الأهداف الهامة لهذا الكتاب هو أن يزودنـــا بطريقة للحديث عن الأصوات بحيث تستطيع هذه الطريقة أن تعطيَنــا وصفا فيزيقيا للتغيرات الحادثة فى ضغط الهواء والتى تناظـــر هذه الفروق، وسنخصص الصفحات الباقية من هذا الفصل لاختبـــار أبسط هذه الفروق ونعنى بها الجانبين اللذين هما : العلـــو loudness والدرجة pitch ،ولنرى هل يمكننا أن نكشـــف مـا يطرأ على الهواء من أحوال تناظر كلا منهما.

من السهل جدا أن نرى كيف تختلف الأصوات من حيث العلـــو loudness. فإذا طرقت شوكة رنانة بشدة ،فإن طرفيها يبـــدآن فى القيام باهتزازات كبيرة تصير تدريجيا أصغر فأصغر حين يبدأ الصوت فى التلاشى . وشبيه بذلك ما ينشأ من ضوضاء عالية عنـــد جذب وتر من الأوتار جذبا قويا،أو عزف أنغام على آلة البيـــان بقوة . لذلك من المنطقى أن نفترض أن الحركة الواسعة لمصـــدر الصوت تنتج صوتا عاليا loud ، وأن الحركة الضيقة تنتج صوتـا خفيا soft . وإذا اعتبرنا ذلك من جهة اهتزازات الهــــواء فسنرى أن الحركة الواسعة للمصدر تنتج حركة واسعة لجزيئات الهواء، أو لنقل إن الصوت ما دام يتكون من اضطرابات فى ضغط الهواء فإن الحركة الكبيرة لمصدر الصوت ينشأ عنها اضطرابات كبيرة فى ضغط الهواء .أما من جانب المستمع فإن هذه الاضطرابات الشديدة فـــى ضغط الهواء، تسبب حركة شديدة لطبلة الأذن مناظرة لها، تفسر علـى أنها أصوات عالية.

وطريقتنا فى رسم الأصوات بيانيا هو أن نبين كيفية تزايـــد

ضغط الهواء وتناقصه . ونستطيع الآن أن نرى كيف نوضح بالرسم البيانى الفرق فى العلو بين صوتين. فالشكل (٢ - ١) هو رسم بيانى لصوتين، أحدهما صوت عال حيث التغيرات فى ضغط الهواء كبيرة ، والثانى هو صوت خفى soft من حيث ضآلة هذه التغيرات بشكل واضح . والشكل (٢ - ٢) هو رسم بيانى(مبالغ فيه بعض الشىء) لتغيرات الضغط المصاحب لشوكة رنانة طُرقت بدرجة متوسطة من الشدة وتركت حتى تسكن، ذلك أنه بُعَيْد طرق الشوكة مباشرة تقل التغيرات الناتجة فى ضغط الهواء بالتدريج شيئا فشيئا .

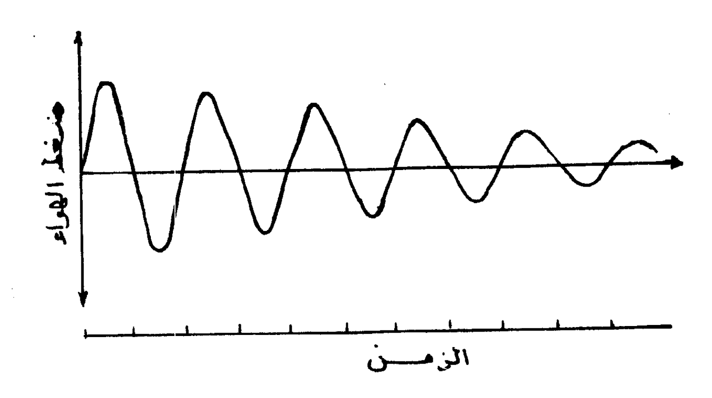
ويسمى الحد الأقصى لتغير ضغط الهواء بالنسبة للضغط العادى



شكل (٢ - ١) صوتان اتساع أحدهما ضعف اتساع الآخر.

أثناء الصوت باتساع هذا الصوت (أو سعته) amplitude *.

فى شكل (٢ - ١) الخطان أ - أ ، بَ - بً يمثلان اتساعى صوتين ويتضح فى هذه الحالة أن اتساع أحدهما يبلغ بالتقريب ضعف اتساع الآخر ، ولأن أحد الاتساعين أكبر من الآخر فإن أحد الصوتين أعلى louder من الآخر .ولكننا طبقا لطبيعة الصوت وطريقة تركيب آذاننا لانعتبر علو أحد الصوتين مساويا لضعف علو الآخر . وسيعطينا الفصل السادس تقديرا أكثر دقة للعلاقة بين الاتساع والعلو . أما ما نحتاجه الآن فهو أن نلاحظ أنه كلما قل اتساع الصوت (حيث تتجه قمم الضغط أثناء الصوت إلى الضَّعف) أُصبح الصوت عندئذ أقل علوا .



شكل (٢ -٢) رسم توضيحى (مع شئ من المبالغة) لجزء من صوت صادر من شوكة رنانة طُرِقت ثم أخذت تخلُد إلى السكون تدريجيا .

* نذكر القارئ بأن هناك معجما فى نهاية الكتاب أوردنا فيه شرحا للمصطلحات الفنية مثل هذا المصطلح. (المؤلف).

والأذن الانسانية حساسة جدا للاختلافات فى ضغط الهواء.فبالنسبة لأخفى الأصوات التى نستطيع سماعها، يجب أن يتغير ضغط الهواء المجاور لطبلة الأذن فقط فى حدود جزء واحدإلى عشرة آلاف مليون . أما بالنسبة للأصوات الأعلى التى نستطيع أن نتعرض لها دون أن تشعر آذاننا بالألم . فإن الضغط يمكن أن يتغير بأكثر من مليون مرة من تلك الكمية.

والاختلافات الحادثة فى حالة الهواء - نتيجةً لعلو الأصوات وخفائها - كثيرة كما علينا أن نتوقع ،فنحن نعلم أن إنتاج صوت عالٍ يتطلب منا أن نبذل طاقة أكبر من تلك الطاقة اللازمة لإنتاج صوت خفى، فلن يدهشنا كثيرا أن يشتمل الضجيج العالى على إثارة أقوى تنتقل عبر الهواء ومن ثم على حركة أكبر يقوم بها غشاء الطبلة فى آذاننا . ومع ذلك فهناك نقطة ينبغى أن نكون حذرين عندها : فلكى ننشىء تغيرات أكبر فى ضغط الهواء فإن على جزيئات الهواء أن تتحرك إلى مسافة أبعد وبسرعة أكبر. ولكن زيادة ضغط الهواء فى الأصوات العالية لايلزم عنه وجود زيادة فى عدد قمم الضغوط التى تحدث فى الثانية الواحدة . ذلكم ما يمكن أن نراه بوضوح فى الشكل (٢ - ١) . فبالرغم من أن اتساع أحد الصوتين يبلغ ضعف اتساع الآخر ،فإن قمم الضغط فى كل منهما مازالت تحدث بنفس المعدل أى قمة واحدة فى كل $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية. وإذن فقد تصنع إحدى الشوكتين الرنانتين اهتزازات أكبر مما تصنعه الأخرى ،ولكن كلتا الشوكتين تصنع نفس العدد من الاهتزازات الكاملة فى الثانية.

ولكى نجعل هذه النقطة غاية فى الوضوح المطلوب. نجرى تجربة بسيطة ،إذا صنعت بندولين يبلغ طول الخيط فى كل منهما ياردة تقريبا وينتهى بثقل مربوط إلى الخيط،فإن كلا منهما سوف يستغرق ثانيتين تقريبا لينجز أرجحة كاملة complete . swing ، فلنبدأ الآن فى تشغيل أحد البندولين بجذبه جذبا

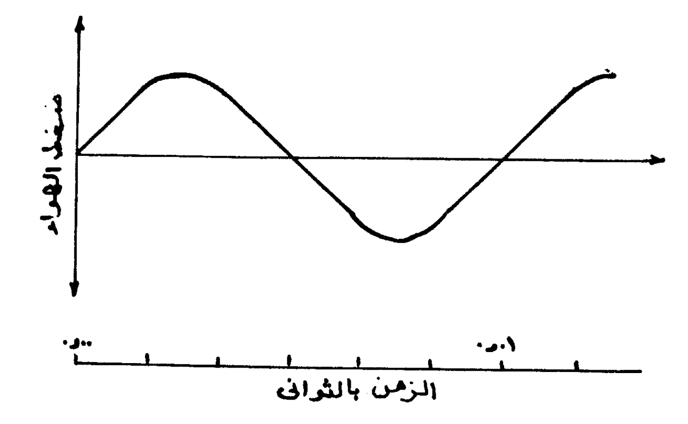
رفيقا إلى أحد جانبيه وفى تشغيل الآخر بجذبه إلى مسافة أبعد كثيرا من مثيلتها فى البندول الأول ؛ وستكون النتجية أن سعة الاهتزازات فى البندول الأول ستكون صغيرة ، أما فى الثانى فان الاهتزازات ستكون ذات سعة كبيرة. بيد أن كلا البندولين سيقوم بنفس العدد من الاهتزازات فى الدقيقة الواحدة تقريبا. ولو إن أحد البندولين أنتج من الاهتزازات vibrations عددا أقل مما ينتجه البندول الآخر فى الدقيقة الواحدة (لأن خيطه أطول)، فإن عدد الاهتزازات سيظل ثابتا على وتيرة واحدة بقطع النظر عن التغيير فى القوة الدافعة له. وإذن فالوقت الذى تستغرقه الاهتزازة الكاملة (للبندول أو الشوكة الرنانة) لايتوقف على خاصية كل أرجحة swing من حيث السعة أو الحجم.

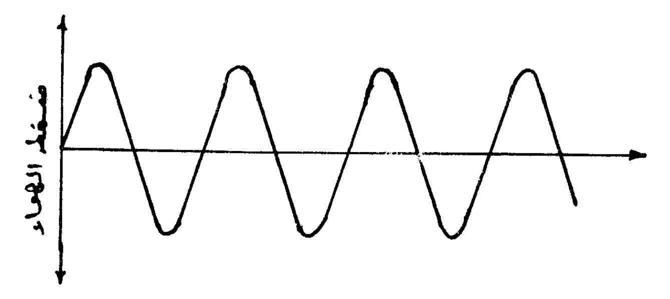
وتغيير المعدل الذى تهتز به شوكة رنانة ،يلزم عنه تغيير المعدل الذى تحدث به قمم الضغوط (كمقابل للقوة التى تتميز بها كل قمة وهى ما نعنيه بالاتساع amplitude) (١) حينما نفعل ذلك فسينتج عن هذا الفعل فروق بين الأصوات بطريقة أخرى هى على وجه التحديد الفروق فى الدرجة pitch . إن الفروق بين شوكة رنانة ذات درجة مرتفعة وأخرى ذات درجة منخفضة هو أن عدد الذبذبات أو الاهتزازات vibrations التى تحدثها أولاهما فى الثانية الواحدة هو أكبر من الأخرى . وبالتالى فإن رسما بيانيا لنغمة ذات درجة مرتفعة ، مقارنة بأخرى ذات درجة منخفضة سيبدو على نحو ما نراه فى الشكل (٢ -٣) . فقمم الضغط فى كلا الصوتين ذات اتساعات واحدة ولكن القمة تحدث فى أحدهما كل

---

(١) هذا مجرد فرض لأنه من المستحيل تغيير معدل اهتزاز الشوكة الرنانة لأنه مقدار ثابت ،إلا إذا أطلنا أو قصّرنا من طول ذراعى الشوكة ، أو غيرنا من مساحتى مقطعيهما أو غيرنا نوع المادة المصنوعين منها . (المترجم).

$\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية ،على حين تحدث فى الأخرى بتردد أكثر وهو مرة كل $\frac{١}{٣٠٠}$ من الثانية ،وهو ما يتجلى لك واضحا من مقياس الزمن فـــى الشكل، وحين يكون الصوت ذا درجة ثابتة ،فإن التغيرات الحادثـــة





شكل (٢ – ٣) يوضح صوتين لهما نفس الاتساع ،ولكن أحدهما تردده ١٠٠ دورة فى الثانية [١٠٠ د/ث] والثانى تـــرردده ٣٠٠ دورة فى الثانيـــة [٣٠٠ د / ث] ٠

فى ضغط الهواء يجب أن تتخذ فى شكلها نموذجا يتكرر على فتـــرات متساوية من الزمن ٠ ويتكون هذا النموذج – فى حالة الشوكـــات الرنانة التى اتخذناها ومانزال أساسا لمناقشاتنا – من زيـــادة

تصل بالضغط إلى ذروة يتلوها تناقص فيه يصل إلى أدنى حد لــه. يتبعه تزايد الضغط مرة أخرى إلى الحد العادى ،وحين يحـدث التغيير فى ضغط الهواء على هذا النحو،فإن هذه السلسلة الكاملة من التغيرات تسمى دورة cycle . وعلى ذلك فإن الدورة هـى عبارة عن التغير الحادث فى ضغط الهواء ،وتبدأ الدورة من اللحظة التى يتغير فيها الضغط على نحو معين وتنتهى عند اللحظة التالية التى يستعيد فيها التغير شكله السابق بكل دقة حيث يبدأ الضغط مرة أخرى [فى إحداث دورة جديدة] مكررا فى تغيره نفس النموذج الحادث فى الدورة الأولى .

فالدورة فى الصوت الأول فى الشكل(٢ - ٣) تحدث مرة كل $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية ،وتحدث مرة كل $\frac{١}{٣٠٠}$ من الثانية فى الصوت الآخر. لذلك يجب أن يوجد فى الحالة الأولى ١٠٠ دورة فى الثانية ،وفى الحالة الثانية ٣٠٠ دورة فى الثانية . وهذا المعدل الذى تحدث بـه الدورات يسمى التردد Frequency. فالصوتان اللذان نتحدث عنهما لهما ترددان هما ١٠٠ دورة فى الثانية (تختصر عادة إلـى د/ث - C.P.S)، ٣٠٠ د/ث ، وحسبنا أن نقول من قبيل التيسير فى معظم الأغراض العملية إن الدرجة pitch ،تعتمد على التردد أو على معدل تكرار التغيرات فى ضغط الهواء. وهكذا يتميز الصوت الثانى فى الشكل (٢ - ٣) بأنه ذو درجة أعلى من الأولى لأنـه ذو تردد أعلى، أى إن الصوت الثانى يشتمل على عدد من التغيرات الكاملة فى ضغط الهواء (أى الدورات الكاملة) فى الثانية الواحدة ،أكثر مما هو موجود فى الصوت الأول .

ولكى يفهم القارئ فرق ما بين التردد والاتساع نقترح عليه اقتراحا جازما أن يقوم باجراء التجربة ببندولين كما هو مبين بالصفحة رقم(٢٣) ،وسوف يكتشف حينئذ أن أى بندول سيهتز باتساعات مختلفة ولكن يظل تردده ثابتا. إذ سوف يستغرق نفس المدة الزمنية

ليكمل أرجحة واحدة one swing للخلف وللأمام (أى دورة واحدة one cycle) بدون اعتبار لحجم هذه الأرجحة. والحقيقة الأكوستيكية المناظرة أن الشوكة الرنانة المعينة يمكن أن تنتج قمما كبيرة أو صغيرة نسبيا من حيث الضغط . ولكن كل سلسلة كاملة من التغيرات فى الضغط سوف تستغرق نفس المدة الزمنية duration . وعلى ذلك فسوف تتكرر التغيرات الدورية فى ضغط الهواء دائما بعدد ثابت فى كل ثانية؛ ويمكن أن يقال بعبارة أخرى إن تردد الصوت frequency سوف يكون ثابتا دائما. ولكى نعبر عن ذلك بلغة الحياة اليومية نقول إن الأصوات التى تصدر عن شوكة رنانة بعينها، سوف تكون لها جميعا نفس الدرجة وإن كان من الممكن أن تختلف من حيث علوها. ولا سبيل إلى أن نغير مدة كل دورة أى إلى تغيير التردد Frequency إلا بتغيير طول البندول أو حجم الشوكة الرنانة.

وحين تُعزى إلى الصوت درجة معينة ،يكون الهواء قد صار يهتز بطريقة منتظمة؛ فعلى سبيل المثال حينما تُطْرَقُ شوكة رنانة درجتها المعيارية (A) standard pitch ،فإن التضاغطات والتخلخلات تحدث فى الهواء المجاور بمعدل ٤٤٠ فى الثانية؛ وكل موجة تضاغط تأتى بالضبط بعد $\frac{١}{٤٤٠}$ من الثانية بعد الموجة السابقة. وبالتالى فطبلة الأذن إذا تأثرت بمثل هذا الصوت ،فإنها تتحرك إلى الخلف وإلى الأمام ٤٤٠ مرة فى الثانية .

والأصوات ذات الدرجة المنخفضة تكون ذات تردد منخفض ، ومصداق ذلك أن كثيرا من مصادر الصوت التى تصدر نغمات منخفضة هى أجسام ضخمة وثقيلة فهى تهتز vibrate ببطء تماما مثل البندول الطويل ،فهو أبطأ اهتزازا من البندول الذى يكون دونه فى الطول . وعلى ذلك فإن الجرس الضخم يكون ذا تردد منخفض من حيث الاهتزاز ،ومن ثم فانه ينتج نغمات [درجات] أكثر انخفاضا

من جرس صغير ،وكذلك تكون الأوتار الطويلة الثقيلة للبيان عند نغمة الباص bass ،بينما النغمات ذات الترددات الأعلى تكون عند نهاية التربل treble (٢) وتنتج من أوتار أصغر، وحينما يصغى المرء لنغمات منخفضة جدا تصدر عن آلة الأرغن ،فإنه يميل إليه أن باستطاعته أن يحس بالقمم التى يحدثها ضغط الهواء منفصلا بعضها عن بعضها وربما يكاد يحصيها، وهذا النوع من الاحساس لا يحدث أبدا عند الإصغاء إلى نغمة مرتفعة .

وحين يكون لدينا نغمتان يبلغ تردد إحداهما ضعف تردد الأخرى تماما ،فإنه يقال إن النغمة الأولى تزيد على الثانية بمقدار درجة على السلم الموسيقى (أُكتاف) octave higher، وعلى ذلك فإن الدرجة المعيارية للنغمة (A) على البيان هى ٤٤٠ د/ث ،والنغمة (A) التى تعلوها (وتكتب غالبا á) هى ٨٨٠د/ث، والنغمة (A) الواقعة أعلى النغمة الاخيرة (a'') هى ١٧٦٠ د/ث . مع العلم بأن هذه الارقام تناظر التردد لدورات الضغط الموجودة فى الهواء، وهذه الترددات سوف تحدث بمعدل مماثل لتردد اهتزازات مصدر الصوت وتردد اهتزازات طبلة الأذن ،وأقل تردد يمكن أن نسمعه كصوت هو حوالى ١٦ - ٢٠ د/ث ، وأعلى تردد يمكننا سماعه هو حوالى ٢٠٠٠٠ د /ث ، وفوق هذا التردد لايمكننا أن نسمع الأصوات ربما لأن طبلة الأذن وسلسلة العظام المتصلة بها [والتى توصل حركتها للأذن الداخلية] لاتستطيع أن تهتز vibrate بسرعة كافية. وعلى أى حال فإن الباحث الذى يدرس الكلام speech ، يهتم - أساسا - بالترددات الأقل من ذلك كثيرا ،وأسرع اهتزازات يمكن للهاتف (التليفون) أن يوصلها هى حوالى ٣٥٠٠ د/ث ،ومعظم

---

(٢) الباص bass هو النغمات المنخفضة الدرجة فى الموسيقى وهى خاصة بالرجال عادة. والتربل treble هو النغمات المرتفعة الدرجة فى الموسيقى وهى خاصة بالأولاد عادة . (المترجم).

الترددات التى تهم تحليل الكلام تقع دون ٨٠٠ د /ث .

وتردد النغمة يمكن أن يتغير بطرق مختلفة ؛ فقد سبق أن لاحظنا - على شرط ثبات العوامل الأخرى - أن الشوكة الرنانة ذات الذراعين الطويلين تهتز أكثر بطءًا (أى أنها تصدر نغمة ذات تردد أقل) من شوكة ذات ذراعين أقل طولا . وكذلك الحال مع الوتر الطويل المشدود فى الباص المزدوج double bass، إذ هو أبطأ اهتزازا من الوتر الأقصر فى آلة الكمان ،ومن ثم فهذا الأخير أعلى منه فى الدرجة .وزيادة الشد tension هو طريقة أخرى لتغيير التردد؛وهكذا يعمد عازف الكمان وهو يختبر آلته إلى أن يزيد من شد الأوتار أو إرخائها ليرفع التردد أو يخفضه.

وفى النهاية ،فإن التغير فى كتلة جسم مهتز سوف يؤثر فى التردد؛ فوتر ثقيل ذو طول معين وتحت شد معين سيكون أبطأ اهتزازا من وتر مساو له فى الشد،ولكنه خفيف،وبنفس الطول.

ونحن نستخدم عادة كلمة " درجة" pitch حينما نشير إلى هذا الجانب من الصوت حيثما نستطيع باستخدام آذاننا فقط أن نضعه على مقياس يتدرج من الانخفاض إلى الارتفاع.وحينما نكون بسبيل دراسة المعدلات الحقيقية للاهتزازات أو معدلات التغيرات الحادثة فى ضغط الهواء فإننا نتحدث عن تردد الصوت ،ونظير ذلك استخدامنا للمصطلح " العلو" loudness حينما نصف إحدى الكيفيات التى يتشكل بها الصوت فى أسماعنا حال تغيره. وهذه الكيفية تناظر - إلى حد ما - ذلك العامل الممكن قياسه تجريبيا والذى نسميه " بشدة الصوت " intensity of the sound . فالشدة مشتقة من الاتساع أو هى كمية الزيادة فى الضغط أثناء نطق الصوت ، وسيكون علينا أن نعالج هذه الملاحظات بمزيد من التوسع والتفصيل فى فصل لاحق، ولكن حسبنا الآن أن نفهم الأمر على هذا النحو : إذا لم يتغير فى صوت ما إلا تردده ،فحينئذ

لايقع التغير إلا فى الدرجة فقط . وكذلك إذا زاد اتساع صوت ما على حين ظل التردد ثابتا ،فإننا حينئذ نسمع زيادة فى العلو .

الفصل الثالث

نوعية الصوت (١)

فى الفصل السابق رأينا كيف يحدث التغير فى الدرجة والعلو؛ علينا الآن أن نعالج الاختلافات فى النوعية quality بأن نحاول -على سبيل المثال - توضيح الاختلافات بين نغمة سى الوسطى معزوفة على البيان ثم معزوفة على الكمان ،أو بيان الكيفية التى يمكن بها صنع أصوات صائتة vowels مختلفة فى نوعيتها،وإن كانت متحدة فيما بينها فى الدرجة •

لم نعالج بالتفصيل حتى الآن إلا نوعا واحدا فقط من النغمات الموسيقية ،وهو الصادر عن شوكة رنانة حيث كانت الحركات الخلفية والأمامية لذراعى الشوكة الرنانة ثابتة ومنتظمة تقريبا •ورأينا فى الفصل الأول أننا إذا أوصلنا سِنًّا راسما بطرف شوكة رنانة فى أثناء صدور الصوت، فإن هذا السن سيرسم منحنى أنسابيا أثناء حركته على صفحة من الورق • ويطلق العلماء على الموجة الصوتية (حين تكون مواصفاتها الرياضية شبيهة كل الشبه بهذا النوع من المنحنيات)مصطلحا علميا خاصا هو الموجة الجيبية sine wave (٢) •

---

(١) "نوعية الصوت"هو ترجمة لكلمة quality • ولقد ترجمه بعض الباحثين " بالطابع أو النوع" ولكننا آثرنا هذه الترجمة لأنها سائغة فى الاستخدام وأكثر دلالة على المعنى المطلوب • (المترجم)

(٢) المنحنى الجيبى هو علاقة رياضية بين الإحداثيات الأفقية والرأسية لمنحنى طبقا للمعادلة الآتية :-

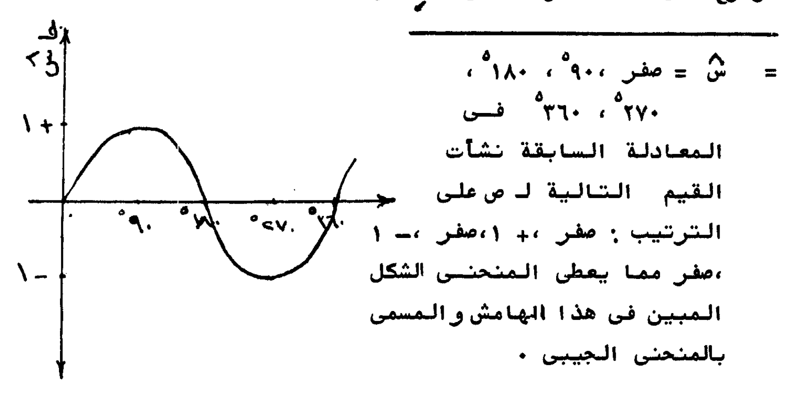
ص = جا سَ

حيث جا سَ = جيب الزاوية س

فاذا عوضنا بالقيم :

=

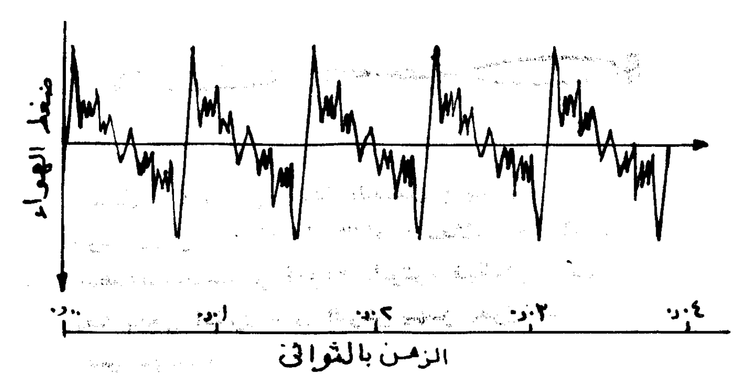
وليست كل الأصوات لها مثل هذه النماذج الموجية البسيطة الناشئة من الشوكات الرنانة • وسبب ذلك أن معظم المصادر الصوتية تهتز بطريقة أعقد من ذلك بكثير• والشكل (٣ - ١) يوضح الشكل الموجي wave shape الناتج عن عزف نغمة على آلة البيان (النغمة الممثلة فى الشكل هى النغمة سى الواقعة تحت نغمة سى الوسطى) • ولنتذكر أن هذا الرسم البيانى يعنى أننا لو استطعنا أن نقيس ضغط الهواء وجدنا أن هذا الضغط يصعد إلى أعلى ثم يهبط إلى أسفل بالطريقة المبينة بالشكل•وإذا أصغيت إلى هذه النغمة ،فإن ضغط الهواء الملاصق لطبلة أذنك سيكون عاليا فى لحظة ما ثم يتناقص بعد ذلك إلى المستوى العادى تقريبا ،ثم يتماوج لأعلى وأسفل وهو يميل إلى التناقص طوال الوقت قبل أن يرتفع فجأة مرة أخرى إلى أقصى مداه• وإذا استخدمنا مكبر صوت يتصل ببعض التجهيزات الكهربائية الأخرى ،ففى إمكانه أن يسجل هذه التغيرات فى ضغط الهواء• وهذا الرسم البيانى مبنى على صورة فوتوغرافية لقياسات ضغط الهواء أخذت بواسطة مكبر صوت موضوع على مسافة قريبة من البيان •



= س̂ = صفر ،٩٠° ، ١٨٠° ، ٢٧٠° ، ٣٦٠° فى المعادلة السابقة نشأت القيم التالية لـ ص على الترتيب : صفر ،+ ١،صفر ،- ١ ،صفر مما يعطى المنحنى الشكل المبين فى هذا الهامش والمسمى بالمنحنى الجيبى •

(المترجم)•

وحين تحدث مثل هذه التغيرات المركبة Complex فى الضغط ، فإن جزيئات الهواء لابد ان تتحرك بطريقة معقدة،وذلك أن هذه الجزيئات فى حركتها الناشئة عن شوكة رنانة إنما كانت مجرد حركة بسيطة مرة إلى الخلف وأخرى إلى الأمام على النحو الذى فرغنا لتونا من وصفه،وأن حركتها كانت شبيهة بحركة ثقل البندول. فهى تبدأ ببطء من أقصى وضع للازاحة ثم تزيد من سرعتها بالتدريج إلى أن تصل إلى وضعها الأصلى ،ومنه تأخذ فى الإبطاء إلى أن تصل إلى أقصى إزاحة لها فى الاتجاه الآخر. وقد رأينا أن

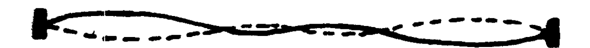


الشكل (٣ - ١) شكل الموجة الممثلة للنغمة س الواقعة تحت س الوسطى على البيان .

هذا النوع من الحركة يناظر ما يحدث فى ضغط الهواء من تغيرات يمكن تمثيلها بواسطة منحنيات انسيابية تعرف بالموجات الجيبية.

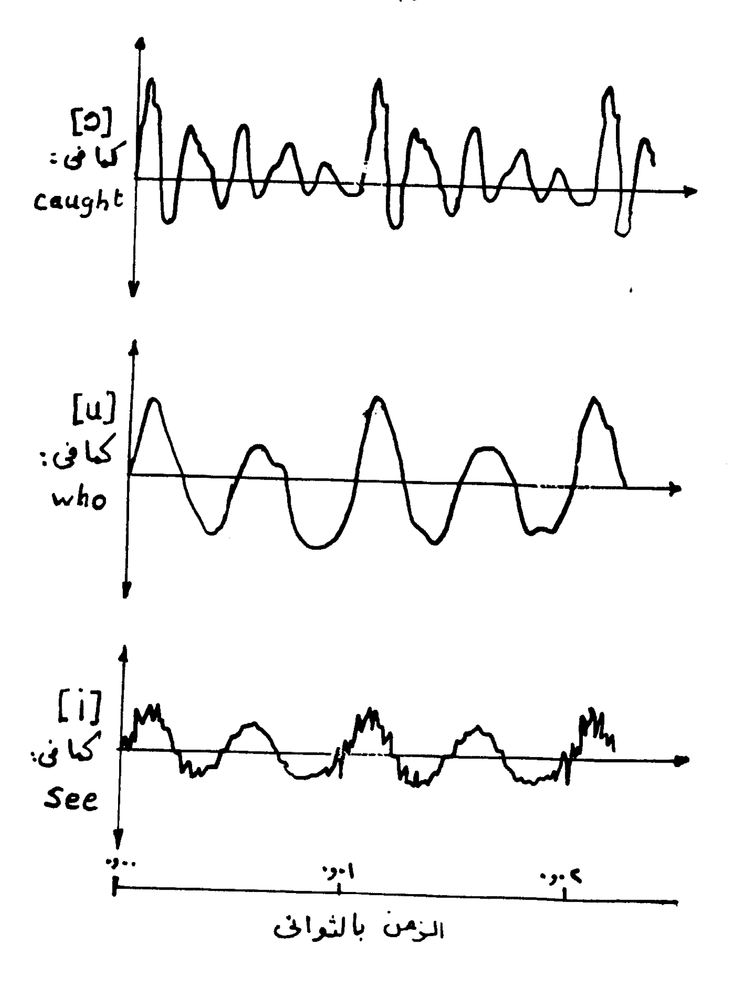
بيد أن التغيرات التى تحدث فى ضغط الهواء نتيجة لعزف نغمة ما على البيان ،هى إلى حد بعيد أكثر تركيبا ،وبعبارة أخرى نقول إن حركات جزيئات الهواء وهى تنقل هذا الصوت تكون فى غاية من التركيب ،وهذا بالتالى يرجع إلى الطريقة المركبة التى يهتز بها وتر البيان ، والوتر المشدود لايشبه ذراعى شوكة رنانة فى حركتها البسيطة إلى الخلف وإلى الامام. فالوتر المشدود

يمكنه أن يُحمل على الاهتزاز بطرق مختلفة فى وقت واحد. والشكل (٣ - ٢) هو رسم بيانى يوضح كيف أن الأجزاء المختلفة فى وتر ما يمكنها أن تهتز بطرق مختلفة فى نفس الوقت. وبمثل هذه الطريقة المركبة تهتز أوتار البيان، ومن ثم تكون سببا فى حدوث التغيرات المركبة فى ضغط الهواء وهى الممثلة فى الشكل (٣ - ١) .



الشكل (٣ - ٢) الخط المتصل : يمثل وضعا واحدا لوتر يهتز، والخط المتقطع : يمثل وضعا آخر يعطى انطباعات لاهتزاز أجزاء الوتر. فبالنظر اليهما معا يمكن القول بأن الوتر يهتز بطرق متعددة فى نفس الوقت .

إذا نظرت إلى الشكل (٣-١) فسوف ترى أن التغيرات فى ضغط الهواء لها نظام معين، فكل $\frac{1}{١٣٠}$ من الثانية يكرر النموذج المركب جميعه نفسه مرة واحدة، وقد سبق أن ذكرنا أن نموذج التغيرات فى ضغط الهواء حين يتكرر على فترات منتظمة من الزمن فإنه يعرف حينئذ بالدورة cycle ، وأن درجة الصوت تعتمد إلى حد كبير على المعدل الذى تتكرر به الدورات، ومعدل تكرار الدورات - التردد - يساوى بالنسبة لشكل الموجة التى نناقشها ١٣٠ د./ث، وحين يزداد هذا التردد فإن الدرجة سوف ترتفع، وعكس ذلك صحيح ، فإذا قل التردد فان الدرجة ستصبح أقل، وتشتمل جميع الرسوم البيانية للموجات الصوتية الواردة فى هذا الكتاب تقريبا على مقياس للزمن . وعلى ذلك يمكن عادة أن يُحسب التردد الأساسى Fundamental Frequency للتكرار فى الموجات



الشكل (٣ ـ ٣) النموذج الموجي الناتج عن نطق المؤلف للصوائت [C] كما في كلمة caught ، [U] كما في كلمة Who ، [i] كما في كلمة See بدرجة ثابتة (ترددها الأساسي ١٠٠ د/ث) • في هذا الرسم وجميع الرسومات التالية يمثل المقياس الرأسي التغيرات في ضغط الهواء إلا إذا نُصَّ على خلاف ذلك •

الصوتية . وعلى القارئ أن يتأكد من أن النص حينما يشير-على سبيل المثال-إلى موجة ترددها ١٠٠ د/ث فإن الرسم البياني يبين لنا نموذجا موجيا يكرر نفسه مرة كل ٠١ر٠ ثانية كما هو موضح على مقياس الزمن .

فالفرق بين نوعيتي صوتي الشوكة الرنانة والبيان إنما يرجع إلى الفرق في درجة التركيب التي تميز الشكل الموجي. وحيثما اختلفت الأصوات في نوعياتها فسنجدها مختلفة في أشكال موجاتها. والشكل (٣ - ٣) يبين الأشكال الموجية الناتجة حينما يطلق المؤلف الصوائت * [i] كما في كلمة See ،[ɔ] كما في كلمة Caught ، و [U] كما في كلمة Who .

وهذه الموجات لها اشكال غاية في التركيب ،ولكنك تستطيع أن ترى أن هذه الصوائت قد نُطِقت جميعا بدرجة واحدة ،ولقد كرر الشكل المركب نفسه في كل منها مرة كل $\frac{1}{100}$ من الثانية.

والفروق بين هذه الأصوات الصائتة تقع جميعها في نطاق النوعية إنها تُسمع كصوائت مختلفة لأن للموجة الصوتية في كل منها شكلا يميزها من غيرها.

ومن بين الموضوعات الأساسية في هذا الكتاب إقامة طريقة توصف بها الموجات الصوتية ؛ ولقد رأينا كيف تُحَدَّد الدرجة بدلالة التردد، أو بدلالة عدد الاهتزازات في الثانية ،وكيف يُحدَّد العلو بدلالة الاتساع أو قمم الضغط . وعلينا الآن أن نحاول وصف النوعية بدلالة الأشكال الموجية المركبة.

إن التردد في جميع هذه الصوائت هو ١٠٠ د/ث ،ذلك أن النموذج الرئيسي يكرر نفسه مرة واحدة كل $\frac{1}{100}$ من الثانية ،غير أن بإمكاننا أن نرى في كل صائت موجة أو موجتين أخريين منتظمتين إلى حد ما مضافتين من أعلى على قمة النموذج

* الرموز الصوتية المستخدمة في هذا الكتاب هي رموز الجمعية الصوتية الدولية ... (المؤلف)

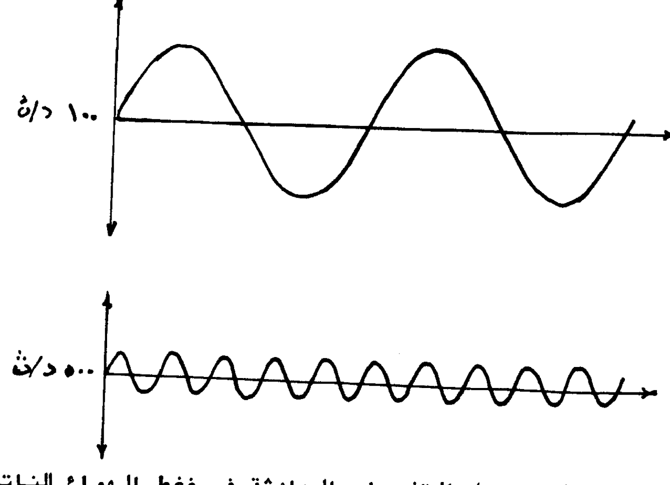
الرئيسى، ففى الصامت [ɔ] كما فى Ca[illegible] تُكرِّر هذه الموجة الإضافية نفسها خمس مرات تقريبا لكل تكرار واحد للنموذج الرئيسى. ونعلم أن تردد تكرار الموجة المركبة هو ١٠٠ د/ث . لذلك فإن الموجة الصغرى فى [ɔ] لها تردد حوالى ٥٠٠ د/ث . كذلك توجد موجة فى الصائت [U] كما فى who يصل ترددها تقريبا إلى ضعف التردد الأساسى fundamental ، وبالتالى فهو بالتقريب ٢٠٠ د/ث أما الصائت [أ] كما فى See فيشتمل على موجتين يمكن فصلهما عن بعضهما بالنظر ،واحدة ترددها ٢٠٠ د/ث، إذ هى تحدث مرتين تقريبا أثناء كل تكرار للنموذج المركب ،أما الأخرى فهى موجة تمثل تغيرا أكثر سرعة فى ضغط الهواء ،وهى تبدو كما لو كانت مضافة من أعلى superimposed على قمة الموجة ذات التردد ٢٠٠ د/ث ،وتحدث حوالى ٣٥ مرة أثناء كل تكرار للنموذج المركب،أى أن تردد هذه الموجة هو إذن حوالى ٣٥٠٠ د/ث .

وهكذا نستطيع أن نرى كيف أن الفروق فى النوعية ممكنة الوصف،فالصوائت [أ] كما فى See ،و [ɔ] كما فى Caught ،و [U] كما فى who حينما يُنْطَق بها جمعا على نفس الدرجة (١٠٠ د /ث) فإنها تتميز بوجود ترددات إضافية ،والقيم التقريبية للترددات الإضافية الرئيسية هى : ٥٠٠ د/ث للصائت [ɔ] و ٢٠٠ د/ث للصائت [u] و ٢٠٠ د/ث بالإضافة إلى ٣٥٠٠ د/ث للصائت [أ] . وهذا بالطبع تبسيط شديد للموقف ،وسوف نرى فيما بعد أن وصف الأصوات المركبة مثل الصوائت تتضمن ما هو أكثر بكثير من ترددين أو ثلاثة ،ولكن هذه الطريقة فى التحليل بالفحص البصرى visual inspection تمدنا بأسس مفيدة للوصف التمهيدى.

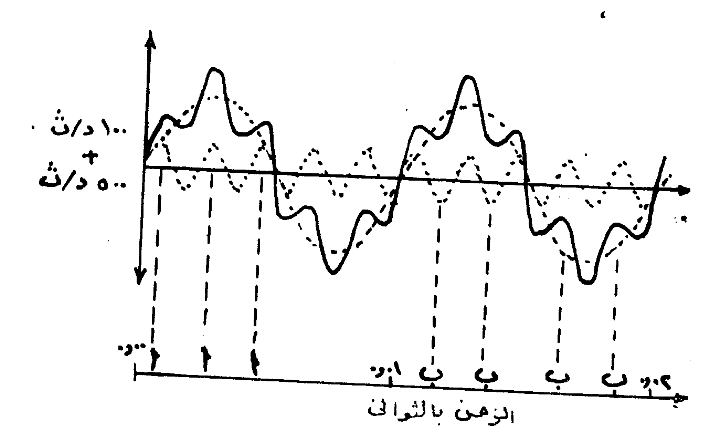
والآن إذا حاولنا أن نعيد تخليق sentiesize هذه الصوائت بإطلاق عدد من النغمات النقية فى وقت واحد،فسيتبين لنا وجوه الضعف فى مثل هذا النوع من التحليل.ولنفترض أننا نحاول أن نركب الصائت [ɔ] كما فى بإنتاج صوت من شوكة رنانة عالية الى حد ما وذات ١٠٠ د/ث (لأنه الترددالقاعدى

basic frequency لتكرار الموجة ذات الشكل المركب) بالإضافة إلى شوكة رنانة ذات تردد ٥٠٠ د/ث (لأنه التردد الرئيسى المركب فوقيا والذى يميز هذا الصائت).والشكل (٣-٤) هو رسم بيانى للتغيرات فى ضغط الهواء الذى ينتج حينما تصدر كل من هاتين الشوكتين صوتها منفصلا .وحينما يطرقان معا فإن ضغط الهواء يتأثر بهما معا. والشكل(٣- ٥) هو رسم بيانى لهذا الموقف . الخطوط المنقطة تمثل تغيرات الضغط التى يجب أن تصدرها الشوكتان منفردتين،والخط المتصل يمثل النموذج الموجى المركب الناتج منهما،ونستطيع أن نتبين أن الشوكتين حينما تعملان معا لزيادة الضغط (كما فى اللحظات الزمنية المحددة بالرمز أ) تكون محصلة الضغط resultant pressure فوق ما ينتجه كل منهما بمفرده. وبالمثل حينما تعمل الشوكتان معا لكى تقللا الضغط،فإن الضغط الناتج يكون أقل من ذلك الذى ينتج من عمل كل شوكة على حدة ،ولكن حينما تكون الشوكتان بحيث تعمل كل منهما ضد الأخرى ، بأن تحاول أحداهما زيادة الضغط بينما تحاول الأخرى التقليل منه (كما فى اللحظات الزمنية المحددة بالرمز ب) ، فإن محصلة الضغط تقع فى مكان ما بين الاثنين.

غير أن الشكل الموجى فى الشكل (٣ - ٥) لايشبه كثيرا الشكل الموجى للصائت [ɔ] كما يظهر فى الشكل (٢ - ٣) ، وإن كان ذلك لايدهشنا كثيرا وذلك لأننا حين نطرق شوكتين رنانتين معا، فإن الصوت الناتج عنهما لايشبه صوت الصائت ،فهذان الشكلان الموجيان اللذان يمكنهما أن يمثلا التغيرات فى ضغط الهواء بجوار طبلة الأذن (وبالتالى فهما يرتبطان بحركات طبلة الأذن) ليساهما الشكلين الموجيين لصوتين متشابهين ،فالشكل الموجى لأى صائت هو مركب إلى حد أبعد من هذين اللذين لشوكتين رنانتين.

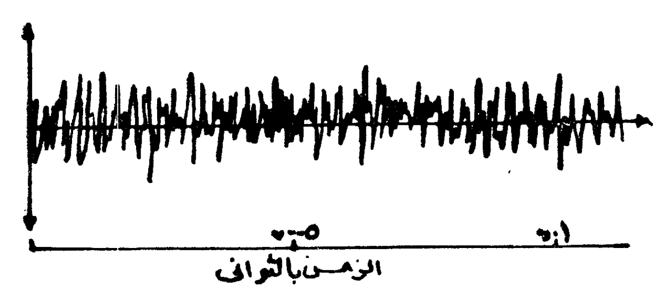


الشكل (٣ — ٤) التغيرات الحادثة فى ضغط الهواء الناتج عن طرق شوكتين رنانتين ، الأولى ترددها ١٠٠ د/ث والثانية ترددها ٥٠٠ د /ث كل منهما على حدة ٠



الشكل (٣ — ٥) الموجة المركبة الناتجة من تركيب الموجتين الموضحتين بالشكل رقم (٣ — ٤) مع بعضهما تركيبا فوقيا ٠

فى دراستنا لأكوستيكيات أصوات الكلام، سوف نضطر لأن نتناول أشكالا موجية أكثر تركيبا حتى من تلك التى للصوائت وشكل(٣-٦) هو رسم توضيحى لموجة الصوت التى تحدث أثناء النطق بالجزء الأخير من الكلمة hiss .

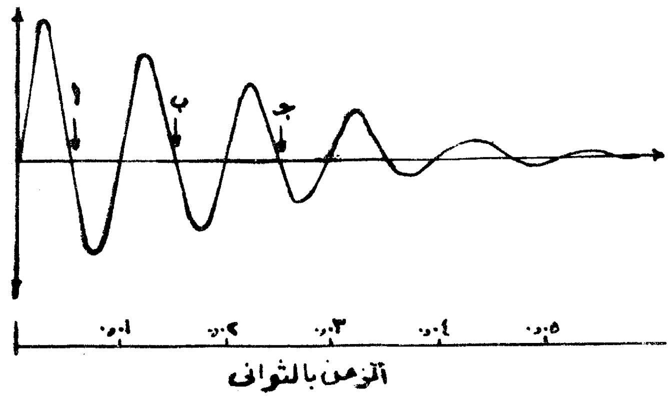


شكل (٣- ٦) موجة الصوت التى تحدثاثناء نطق الجزء الأخير من الكلمة hiss .

ويمكننا كالعادة أن نعتبرها تمثيلا للتغيرات فى ضغط الهواء ، الذى يحدث بجوار طبلة الأذن ،هذه التغيرات سوف تسبب - بطبيعة الحال - حركات لطبلة الأذن والتى تُدْرَك بواسطة المخ أصواتا. ولكن حركات طبلة الأذن - على خلاف كل الأصوات التى بحثناها فيما سبق - لن تكون منتظمة مادام ضغط الهواء يعلو ويهبط بطريقة غير منتظمة.

والمناسب - غالبا - أن ننظر إلى الأصوات التى تصاحبها تغيرات فى ضغط الهواء،ولا تخضع لنموذج منتظم على أنها من طبقة مختلفة عن تلك التى تصحبها دورة من تغييرات ضغط الهواء والتى تتكرر فى انضباط على فترات منتظمة من الزمن . والشكل(٣ - ٧) هو رسم بيانى لصوت آخر ذى نموذج موجى لاتكرارى - "none repetitive wave form. لاحظ بصفة خاصة - أنه بالرغم من أن التغيرات فى ضغط الهواء التى تحدث فى خلال الفترة من الزمن (أ) الى الزمن (ب) ،مشابهة بتلك التى تحدث خلال الفترة

من الزمن (ب) الى الزمن (جـ) ،فإن اتساع الاهتزازة يختلف فيها إلى حد كبير،وعلى ذلك فهما لايتماثلان. وفى هذا الصوت لايوجد نموذج للتغيرات فى ضغط الهواء يتكرر تماما على فترات منتظمة من الزمن .



الشكل (٣ – ٧) شكل موجى لاتكرارى

ومن الطبيعى إذا شئنا الدقة فى معالجة الأصوات علينا أن نعترف بأن كل صوت درسناه حتى الآن – وبالتأكيد كل صوت ترغب فى دراسته مستقبلا – له فى الحقيقة نموذج موجى لاتكرارى.ذلك أنه لايمكن أن يتكرر إلى مالا نهاية نموذج من نماذج اختلافات الضغط فى أى صوت حقيقى تكرارا دقيقا على فواصل زمنية منتظمة. بل إن اهتزازات الشوكة الرنانة تتلاشى – كما لاحظنا – فى نهاية الأمر. ومن ثم فان كل موجة ستقل عن سابقتها من حيث اتساع الاهتزازة كما أنها لن تكون مماثلة لها تمام المماثلة. وفوق ذلك فإننا حين نطرق شوكة رنانة لتبدأ فى الاهتزاز المستقر فستظل الموجات الناتجة أبعد ما يكون عن الاتصاف بصفة التكرارية الدقيقة.

وعلى أى حال فإن الأخطاء الناتجة من عدم الالتفات إلى هذه العوامل صغيرة جدا . وسوف نفترض من قبل التبسيط أن بعض الأصوات تشتمل على دورات من تغيرات ضغط الهواء تتكرر تكرارا

دقيقا على فواصل زمنية منتظمة ،على حين تشتمل أصوات أخرى على نماذج موجية لاتكرارية (التمييز بين هذين الصنفين من الأصوات عولج فى ص ٦٥) .

كلا هذين الصنفين من الأصوات ذو أهمية عظيمة لدارس الكلام، فالكلمات المنطوقة كما نعلم تتكون من أصوات تتغير باستمرار من حيث النوعية .وفى بعض الأحيان يتغير الشكل الموجى تغيرا جد سريع كما نلحظ فى موضعى البداية والنهاية من كلمة peak . إن ما يؤثر على آذاننا من تغيرات فى ضغط الهواء يكون مفاجئا جدا وغير منتظم irregular ،وعلى ذلك فسنعتبر أن الكلمة peak تبدأ وتنتهى بشكل موجى لا تكرارى . وحين نقارن مثل هذين الصوتين بالجزء الأوسط من الكلمة peak ، سنجد أنه يستمر لمدة ملحوظة من الزمن بدون تغير كبير فى النوعية ، ولذا نعتبر هذا الجزء من الكلمة مشتملا على تغيرات منتظمة فى ضغط الهواء.

ومن بين ما تتميز به الأصوات ذات الشكل الموجى اللاتكرارى استحالة أن يعزى لها درجة محددة ؛وذلك أن درجة الصوت كما رأينا من قبل، تتوقف إلى حد كبير على التردد الذى تتكرر به دورة التغيرات فى ضغط الهواء ،والأصوات التى لايتكرر فيها أى جزء من شكلها الموجى تكرارا يتسم بالثبات والمطابقة ،لايكون لها درجة محددة.فحينما نصغى إلى تيغرات ضغط الهواء غير المنتظمة الصادرة من إشعال عود ثقاب أو حفيف أوراق الشجر،فسنجدنا غير قادرين على أن نقول شيئا يذكر من حيث اشتمال هذه الأصوات على درجة ما، وكذلك الحال فى الشكلين الموجيين اللاتكراريين الواقعين فى البداية والنهاية من كلمة Peak ،حيث لايحصل لدينا إحساس بوجود درجة منضبطة. فإذا استطعنا القول بإن هذه الكلمة قد أمكن نطقها بدرجة محددة فإن الفضل فى ذلك سيعود إلى تغيرات ضغط الهواء الأكثر انتظاما والتى تحدث فى الجزء الأوسط منها .

ويكمن الفرق الأساسي بين هذا الكتاب وغيره من الكتب التي تدرس الأكوستيكا ،هو إننا أكثر اهتماما بالأشكال الموجية اللاتكرارية . فسوف نتعامل مع جميع أنواع الأصوات ابتداء من تلك التي ليس لها شكل موجي نمطي على الإطلاق ، إلى تلك التي يكاد يكون شكلها الموجي فيها مكررا إلى حد كبير ،وإن لم يكن مكررا تمام التكرار . وهناك في الواقع اسم خاص للصوت ذي الشكل الموجي الذي بلغ أقصى تركيب له إذ يسمى "بالضجة البيضاء" White noise . وهذه التسمية ترجع إلى التشابه مع الضوء الأبيض White light ،وهو ضوء يتكون من جميع ألوان قوس قزح،والضجة البيضاء هي صوت مركب Complex ،يتكون من كميات متساوية من جميع النغمات الممكن سماعها. وأقرب شيء إليه مما اعتدنا سماعه هو صوت " الهسيس " والذي يحدث في خلفية الصورة السمعية للمذياع (٣) .

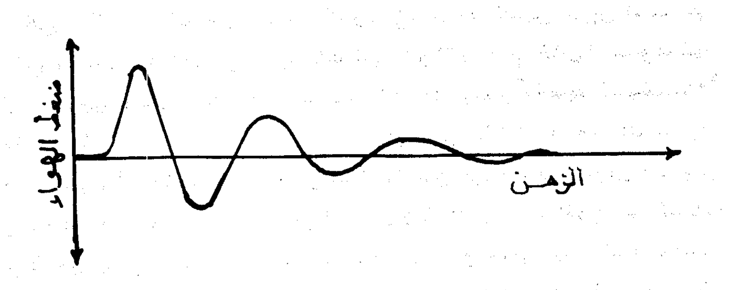
وهناك أصوات متعددة تحدث في الكلام والتي تشبه - تقريبا - الضجة البيضاء في تركيبها. ولقد ذكرنا توا الصوت الذي يحدث في نهاية كلمة hiss . أما غير ذلك من الأصوات التي تنتمي إلى هذا النوع فتحدث في موضعي البداية والنهاية من كلمة fish .

وهناك شكل موجي أقل تركيبا - إلى حد ما - وهو أيضا ذو أهمية كبيرة لنا في دراستنا للكلام يوضحه الشكل رقم (٣ - ٨) ، وهو نوع من الأصوات التي تحدث عند إفراغ زجاجة ما ، والشكل

---

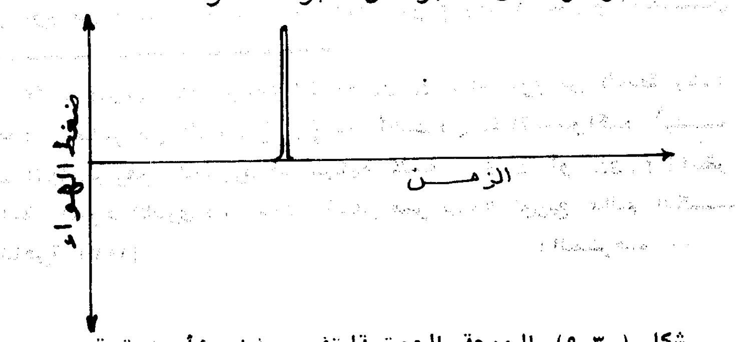
(٣) الهسيس : هو ترجمة لكلمة hiss وهو نوع من الضجة يشبه الصوت الصادر من الصوت [س] لو أطلت في نطقة .ويواكبه أيضا صوت الهشيس وهو الموجود في نهاية كلمة hush أو fiʃ (انظر دراسة الصوت اللغوي د. احمد مختار عمر ص ٩٨ توزيع عالم الكتب القاهرة ١٩٧٦) . (المترجم).

يبين أن ضغط الهواء يتغير بطريقة منتظمة إلى حد كبير، ولكن اتساع كل قمة ضغط يقل بمقدار ملحوظ عن اتساع قمة الضغط السابقة .



شكل (٣ - ٨) الموجة الصوتية الناتجة من إفراغ زجاجة

وأخيرا يجب أن نضع فى الاعتبار هنا الصوت الصادر من التفريغ المفاجىء very sharp tap لبعض الأشياء التى لاتميل إلى الاهتزاز . فلو أن التفريغ كان مفاجئا بما يكفى، فقد يسبب ارتفاعا مفاجئا فى ضغط الهواء ثم هبوطا مفاجئا أيضا يتساوى فى سرعته مع الارتفاع المفاجىء كما نرى فى شكل (٩ - ٣) وأقرب شىء إلى هذا النوع من الأصوات هو الفرقعة click التى تحدث حينما ندير أو نطفىء مكبرا من مكبرات الصوت .



شكل (٣-٩) الموجة الصوتية لتفريغ مفاجىء أو فرقعة .

وفى كتب أخرى من كتب الأكوستيكا نستخدم أحيانا كلمة "عابرة" transient لتطلق على مجموعة خاصة من الأصوات ناقشناها فيما سبق، غير أننا سنتجنب فى كتابنا هذا استخدام هذا المصطلح مادام فيه سبب للخلط . وسوف نرى فى الفصل التالى أن تقسيم جميع الأصوات الى قسمين - بحسب امكان اعتبارها أو عدم اعتبارها ذات نماذج موجية لاتكرارية - قد اعتُمِد ليسر التحليل. وسيكون من المناسب يقينا لو كان هناك مصطلح عام يمكن استخدامه ليطلق على كل الأصوات ذات الاشكال الموجية اللاتكرارية بما فى ذلك " الضجيج " للهسيس الذى يستمر لمدة مناسبة . و"الصوت المكتوم" dull thud الذى يحدث حينما يرتطم شئ هاوٍ بالأرض ، والفرقعة وهى التى تنتج من تغير واحد مفاجئ فى ضغط الهواء. وما دام يعوزنا وجود مصطلح عام متفق عليه يُطْلَقُ على كل هذه الأصوات ، فسوف نستمر فى وصفها بأنها " أصوات يمكن اعتبارها ذات نماذج موجية لاتكرارية " وهى جملة متضخمة إلى حد ما ولكنها واحدة من تلك الجمل التى لايمكن تجنبها .



الفصل الرابع

تحليل الموجة الصوتية

رأينا فى الفصل السابق كيف يمكن أن تأتلف نغمتان من النغمات النقية لينتجا معا شكلا موجيا مركبا complex (١) wave shape ، أما الأمر الذى لاتتاح لنا رؤيته بقدر كبير من اليسر والسهولة ،فهو أن بامكاننا - إذا استخدمنا عددا كافيا من النغمات النقية -أن نقوم بتخليق أى شكل من أشكال الموجات الصوتية. إن الأشكال الموجية للصوائت فى شكل (٣ - ٣) والاشكال الموجية اللاتكرارية التى درسناها فى الفصل السابق ، من الممكن تخليقها جميعا شريطة أن نأخذ عددا كافيا منالنغمات النقية ثم نركبها معا بطريقة ملائمة.

وتُعرَف الطريقة التى تُعالَج بها الموجة المركبة بوصفها توليفامناسبا لعدد من النغمات النقية باسم: تحليل فورييير Fourier analysis ؛ذلك أن النظرية التى هى أساس لهذا التحليل قد اكتشفها الرياضى الفرنسى فورييير عام ١٨٢٢م ،وهى من المفاهيم الأساسية فى الصوتيات الأكوستيكية مما يقتضينا أن نسوق - بالإضافة إلى ما سبق - مثالا أو مثالين آخرين.

يمكننا أن نبدأ بأن نركب موجة ترددها ١٠٠ د/ث مع موجة صغيرة ترددها ٢٠٠ د/ث ،بالإضافة إلى موجة أكبر قليلا ترددها٣٠٠ د/ث . ويمكن رؤية النتيجة فى شكل (٤ - ١).إن الموجة المركبة

(١) النغمة النقية هى موجة صوتية تتكون من مكون ترددى منتظم واحد بسيط،ولذا يجئ أثرها الصوتى على شكل موجة جيبية Sine wave . وهذه الموجة الجيبية لايمكن أن تتحلل إلى موجات أبسط منها كما سوف نرى . (المترجم) .

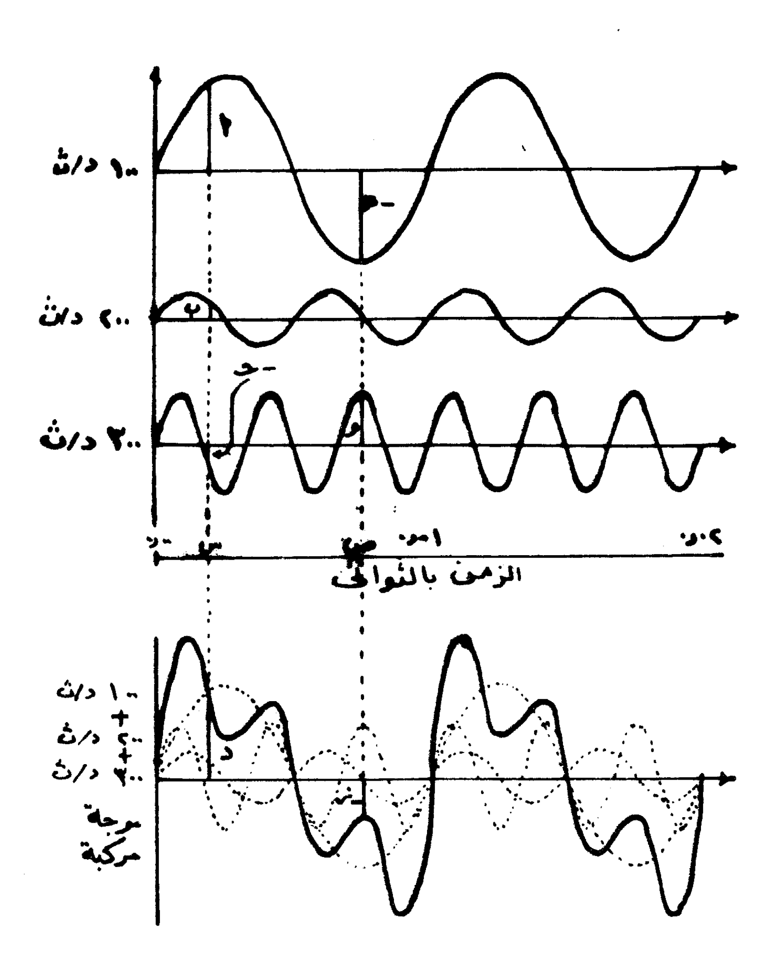
هـى ببساطة النتيجة لحاصل جمع الكميات الزائدة فى ضغـط الهواء (أى تلك النقط الواقعة على المنحنى فوق الخط الـذى يمثل الضغط العادى normal pressure)(٢)، بالإضافة إلـى طرح النواقص فى ضغط الهواء (وهى تلك النقط التى تقع تحـت الخط). فعند اللحظة الزمنية س - على سبيل المثال - تتسبب نغمتان من النغمات النقية فى إحداث زيادة فى الضغط بكميتين يمثلهما الخطان (أ) و (ب). بينما تتسبب النغمة الثالثة فى إحداث انخفاض فى الضغط بكمية يمثلها الخط (ج). ومن ذلـك تتكون محصلة الاتساع فى ضغط الهواء ويمثلها الخط (د)، ويساوى طول هذا الخط : أ + ب - ج .

وبالمثل ، ففى اللحظة الزمنية (ص) تكون محصلة ضغط الهواء هى (- ز) . (وهى سالبة لأنها تحت الخط ، أى إنها نقطة تمثل لحظة من لحظات التخلخل أو الإنخفاض فى الضغط).

وفى هذه الحالة فإن - ز = - هـ + و . فالمكون الموجى الذى تردده ٢٠٠ د/ث ليس له تأثير فى هذه اللحظة مادام اتساعه يساوى صفرا. ويمكن أن نعالج أى نقطة فى الموجة المركبة بهذه الطريقة. فالضغط فى هذا المثال هو دائما حاصل تجميع تغيرات الضغط التى تسببها المكونات الموجية المفردة سواء كان هذا التجميع بالجمع أو الطرح. ومن أجل التأكد من صحة ذلك فعلى القارىء أن يقيس ارتفاعات المكونات components الموجية فى أى لحظة مناسبة حتى يتحقق أنها تتركب معا وتنتج النقطة التى تقع فى نفس اللحظة على الموجة المركبة.

---

(٢) الضغط العادى normal pressure هو الضغط الجوى السائد فى وقت اجراء التجربة وهو عادة يعادل ضغط عمود من الزئبق ارتفاعه ٧٦ سم وقد يزيد أو يقل عن ذلك. (المترجم).



شكل (٤ - ١) توليفة من ثلاث موجات ترددا اتها :
١٠٠ د/ث، ٢٠٠ د/ث ، ٣٠٠ د/ث تشكل موجة مركبة .

فإذا توقفنا عند موجة مركبة مثل تلك التى قمنا بتركيبها فى شكل (٤ - ١) ،فإن مشكلتنا هى أن نعرف كيف نصفها .

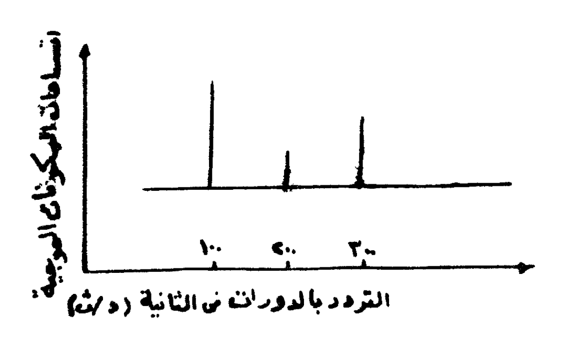
ونستطيع أن نرى بادىء ذى بدء، أن تردد التكرار فى الشكل الموجى المركب هو ١٠٠ د/ث . ويُعرَف هذا "بالتردد الأساسى" funda - mental frequency . وقد يُكتَفَى فى تسميته بكلمة " الأساسى" وصفا لها. وتعتمد درجة الصوت التى نسمعها - فى المقام الأول - على التردد الأساسى.

ولكى يكون وصفُنا لشكل الموجة أكثر وفاء، علينا أن نحدد المكونات الموجية الداخلة فى تركيب الموجة المركبة. فى هذه الحالة يمكننا أن نقول إنها مؤلفة من تردد أساسى مقداره ١٠٠ د/ث ،بالإضافة إلى نغمتين أخريين ، وتُعرَف هاتان النغمتان الإضافيتان بالنغمتين التوافقيتين harmonics .والتوافقية هى أى عدد صحيح من مضاعفات التردد الأساسى . وفى الموجة التى هى موضوع المناقشة ،يسمى هذان المكونان الموجيان بالتوافقية الثانية والثالثة ،لأن إحداهما هى ضعف التردد الأساسى والثانية هى ثلاثة أمثاله . ولو كان لدينا مكونتان موجيتان ترددا تهما ٤٠٠ د/ث ،و ١٠٠٠ د/ث لسميناهما بالتوافيقتين الرابعة والعاشرة (*) .

(*) فى بعض المتون القديمة التى عالجت علم الأكوستيكا ، يطلق على المكون الموجى الذى يساوى تردده ضعف التردد الأساسى اسم التوافقية الأولى ؛ وعلى المكون الموجى الذى تردده يساوى ثلاثة أمثال التردد الأساسى اسم : التوافقية الثانية .... الخ. ولقد استبعدنا هذه التعبيرات القديمة لأنها مربكة من الناحية الحسابية مثل تعبير " ثمانية أيام" الذى يطلقه الفرنسيون على " الأسبوع " ، أو كما يستخدمون تعبير " خمسة عشر يوما" بالنسبة للأسبوعين .

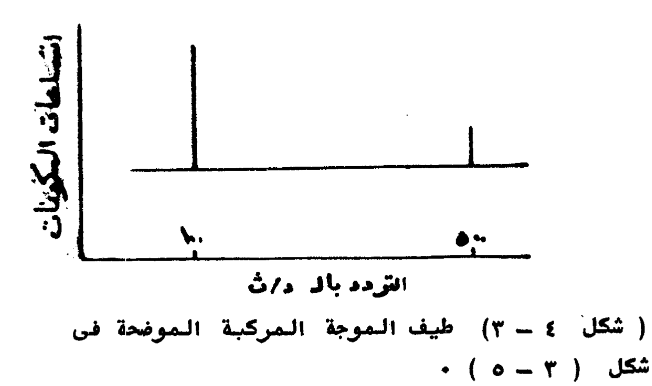
(المؤلف)

ولكى يكون وصفنا لشكل الموجة فى الرسم رقم (٤ – ١) أكثر وفاء علينا ألاّ نكتفىّ فى الوصف ببيان الترددات الداخلة فى تكوينه (وهى فى مثالنا هذا : ١٠٠ د/ث ، ٢٠٠ د/ث ، ٣٠٠ د/ث) ، بل ينبغى أن نبين أيضا اتساعات هذه الموجات (أى حجم قمم الضغط التى تشتمل عليها هذه الموجات) ، ويظهر من الرسم الذى أوردناه لها أن التردد الأساسى هو أكبر الثلاث [أى من حيث الاتساع] ، وأن التوافقية الثانية هى أصغر إلى حد كبير ، أما الثالثة فهى حوالى $\frac{٣}{٥}$ حجم الموجة الأساسية . وإذا مثلنا الاتساعات النسبية لهذه المكونات الموجية بخطوط ذات أطوال متناسبة ، فإننا نستطيع أن نصنع رسما بيانيا على النحو المبين فى الشكل رقم (٤ – ٢) . وهذا النوع من الرسوم البيانية ذو أهمية كبيرة فى علم الأكوستيكا ويسمى (طيف الصوت) spectrum of a sound ـ إنه بيان بالمكونات الموجية للصوت ، وهو يمدنا بوصف أكثر بساطة من ذلك الذى يتيحه لنا رسم بيانى فى شكل موجة مركبة .



شكل (٤–٢) طيف الموجة المركبة الموضحة بالشكل رقم (٤–١)

ومن الممكن أن نرسم رسما بيانيا لطيف أى صوت . وعلى سبيل المثال فحينما كنا نحاول تخليق الصائت [ɔ] الموجود فى كلمة Caught بأن نقرع شوكتين رنانتين (الشكل ٣ ـ ٥) استطعنا أن نقدم رسما توضيحيا للموقف على النحو المبين فى الشكل رقم (٤ ـ ٣). فالموجة المركبة التى أنتجناها تتألف من مكونين : أحدهما موجة ترددها ١٠٠ د/ث (وهى الأساسية) والثانى موجة ترددها ٥٠٠ د/ث (التوافقية الخامسة للأساسية) . والنسبة بين الاتساعين هو ٣ : ١، أى أن الأساسية كانت أكثر قوة من التوافقية. وكل هذه المعلومات ينقلها لنا الرسم البيانى (٤ ـ ٣). وبالمثل يمكننا أن نقدم رسما بيانيا لمكونات الموجة المركبة الصادرة من آلة البيان . فالنغمة (س) الواقعة أسفل (س) الوسطى، والتى يظهر شكلها الموجى فى الشكل رقم (٣-١)، يمكن أن توصف وصفا طيفيا على النحو الموضح فى الشكل رقم (٤ ـ ٤) . ويبين هذا الشكل أن الموجة المركبة يمكن أن تكون مكونة من نغمة أساسية وعدد كبير من التوافقيات.



(شكل ٤ ـ ٣) طيف الموجة المركبة الموضحة فى شكل (٣ ـ ٥) .

وإذا استبعدنا التوافقيتين الخامسة عشر والسادسة عشر وهما على درجة من عدم الوضوح والخفوت لا تسمح لهما بالظهور، فإن جميع التوافقيات حتى الثامنة عشر تؤدى دورا فى بناء الموجة المركبة. لاحظ أن محور التردد فى هذه الرسوم التوضيحية هو وحده الذى زُوِّدَ

بالتدريج الكمى Calibration . ولم تُوَضَّحْ على الرسم أى قيم مطلقة لتمثيل الاتساعات لأن شكل الموجة المركبة يُحَدَّد بالقـــوة النسبية للمكونات.



شكل (٤ – ٤) رسم طيفى لشكل الموجة الموضح فى الشكل (٣ – ١) ويمثل النغمة (سى) الواقعة تحت (ســـى) الوسطى فى آلة البيـــان .

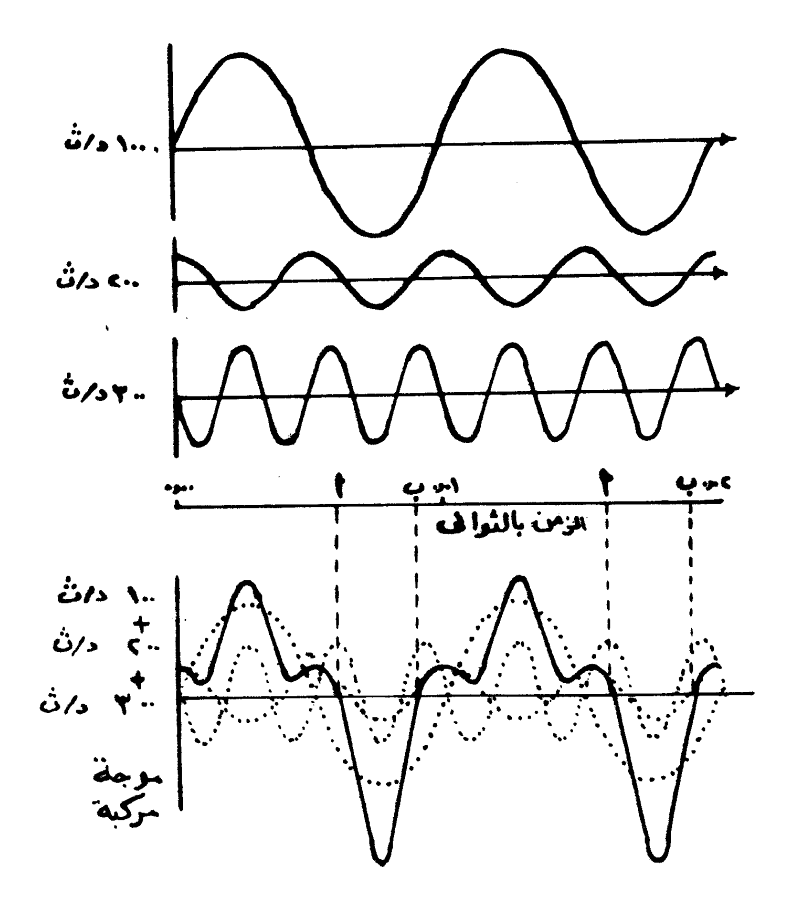
وحين يزيد الاتساع فى أى موجة مركبة (أى حين يصبح الصوت أعلى) فإن الاتساعات فى جميع المكونات تزيد بالنسبة نفسها.

وينحى الرسم التوضيحى للطيف فى أى صوت من الأصوات جانبـــا بعض المعلومات الموجودة فـى الموجة المركبة ؛ومن ثم فهو يُعَـدُّ من بعض الوجود ، نوعا من التبسيط، إذ إنه لايقدم لنا كافـــة المعلومات عن الطريقة التى يتم بها توليف المكونات. ففى الشكل رقم (٤ – ١) رُسِمت المكونات بحيث تكون النقطة التى يبدأ الرسم البيانى منها فى وضع تتمكن به جميع المكونات الموجية من إحداث زيادة فى الضغط ، ولكن لنفترض الآن أن هذه النغمات النقيـــة (التى يمكنها أن تمثل أصواتا مصاحبة لشوكات رنانة) لم تكـن مركبة بهذه الطريقة . وإذا كنا نتأمل موجة من ذلك النوع الذى قمنا بتركيبه ،فمن الممكن جدا أن نتخيل أن على إحدى هذه الشوكات الرنانة أن تبدأ حركتها قبل الشوكتين الأخريين،وعلى ذلك ففـى

اللحظة الزمنية التى توقع فيها هذه الشوكات جميعها بحيث يقارب بعضها بعضا إلى أقصى مدى ممكن (يجوز أن تحدد هذه اللحظة الزمنية افتراضا بنقطة الصفر على الرسم البيانى) سينشأ وضع يمكن أن يوضحه لنا الشكل (٤ - ٥) . وهنا ، أى فى بداية هذا الرسم البيانى نجد أن الشوكة الرنانة ذات التردد الأدنى توشك أن تحدث زيادة فى الضغط ، على حين أن الشوكة الرنانة الثانية تنتج موجة تأخذ فى الانحدار من أقصى ذروة وصل إليها الضغط. أما الشوكة الرنانة الثالثة فهى تأخذ طريقها إلى إحداث نقصان فى الضغط . فإذا جمعنا الآن تغيرات الضغط كما فعلنا فى المرات السابقة ، فإن الموجة المركبة الناتجة ستبدو على الصورة التى أوردناها . وفى أى لحظة يكون الضغط للموجة المركبة هو نتيجة الجمع أو الطرح للضغط فى المكونات، ومثال ذلك أنه فى اللحظتين الزمنيتين اللتين تحددهما النقطة (أ) والنقطة (ب) يكون التغير بالنسبة لضغط الهواء العادى هو صفر، لأن تغيرات الضغط الناتج من المكونات يلغى بعضها بعضا عند هاتين النقطتين.

هذا الشكل الموجى المركب يكرر نفسه مائة مرة كل ثانية . وهو من هذه الجهة شبيه بالموجة المبينة فى الشكل (٤ - ١) ، بيد أن هاتين الموجتين تبدوان - من جهة أخرى - مختلفتان جدا؛ ومع ذلك فلكل منها مكونات لها نفس الترددات والاتساعات، والفرق إنما يرجع فقط إلى الطريقة التى رُكّبت بها هذه المكونات، وهذا الفرق فى التوقيت للمكونات يعرف " بفرق الطّوْر" difference of phase .

ولأن الموجتين فى شكل (٤ - ١)، و (٤ - ٥) يمكن تحليلهما إلى نفس المكونات ، سيكون الرسمان البيانيان الموضحان لتكوينهما الطيفى متماثلين .



شكل(٤ — ٥) توليفة من موجات ترددا تها : ١٠٠ د/ث ، ٢٠٠ د/ث ، ٣٠٠ د/ث ،وهى تختلف عن تركيبها التى جاءت به فى شكل (٤—١) من حيث التوقيت النسبى، ومن ثم فهى تشكل موجة مركبة مختلفة.

إن طيف الصوت يوضح فقط أى الترددات التى توجد، وبأى اتساعات ،ولكنه لايوضح عادة الطريقة التى تتركب بها المكونات

فالشكل (٤ - ٢) إذن هو الطيف المناظر لكل من الموجة التى فى شكل (٤ - ٢) وكذلك التى فى شكل (٤ - ٥) مادام هذا الشكل يعنى صوتا تردده الأساسى ١٠٠ د/ث مركبا مع توافقية ثانية يبلغ اتساعها $\frac{٣}{١٠}$ من اتساع النغمة الأساسية، وتوافقية ثالثة اتساعها $\frac{٣}{٥}$ اتساع النغمة الأساسية.

ومن الممكن أن ننتج - بوسائط كهربائية - نغمات نقية يمكن تركيبها بحيث تصنع كلا الشكلين الموجيين المناظرين للطيف الموضح بالشكل (٤ - ٢) ، بل إنه من الممكن أن نغير الطريقة التى تتركب بها المكونات لكي يتغير ببطء شكل الموجة الموجود بالشكل رقم (٤ - ١) ويتحول إلى ذلك الموجود بالشكل رقم (٤ - ٥) مارا فى طريقه بمجموعة متعددة من الأشكال الموجية الأخرى. والشىء المثير للدهشة هو أن آذاننا لايمكنها أن تميز أى فرق بين كل هذه الأشكال الموجية، فمادامت المكونات قد بقيت على ما هى عليه ، فإن الصوت يبقى كما هو . وبصرف النظر عن الحالات الخاصة والتى تشتمل على أصوات عالية جدا (والتى من المحتمل أن لا تكون ذات أهمية بالنسبة للكلام كما يهتم به علم الأكوستيكا) ، فإن نوعية الصوت لا تتوقف على الطريقة التى تتركب بها المكونات، بل تتوقف ببساطة على الترددات والاتساعات التى تتشكل منها الموجات المركبة .

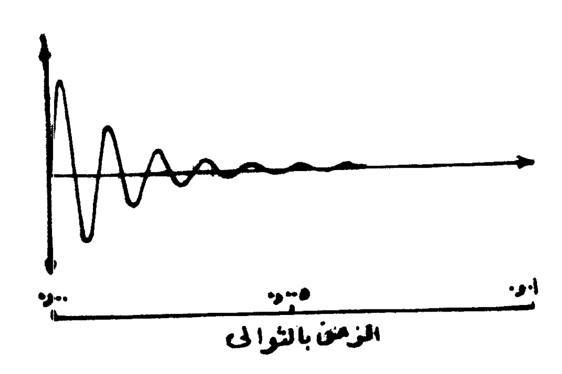
نستطيع الآن أن نتبين : لماذا لايعطينا شكل الموجة طريقة شافية لوصف نوعية الصوت . فنحن يمكننا أن نعتبر أى صوتين من الأصوات متطابقين لأنهما يتشكلان من مكونات متطابقة وإن اختلفا من حيث شكل الموجة كل الاختلاف . وفوق ذلك ، قد تتخذ الموجة الصوتية مع بعض الأصوات شكلا معينا فى بعض الأحيان ، وشكلا آخر مختلفا فى أحيان أخرى(ومثال ذلك الصائت [i] كما فى الكلمة الإنجليزية See) . ومع ذلك فنحن نسمع كلا الصوتين كما لو كانا صائتا واحدا شريطة أن تظل المكونات التى تتألف منها هاتان

الموجتان واحدة . ويترتب على ذلك أنه من الأفضل غالبا أن نمثل الصوت برسم بيانى يوضح طيفه أكثر من أن نمثله برسم بيانى يوضح شكل الموجة فيه . والتكوين الطيفى للصائت [i] كما يظهر فى كلمة see سوف يبقى دائما على ما هو عليه مادامت المكونات الموجية فيه لم تتغير.

ولقد أصبح ممكنا فى السنوات الأخيرة انتاج عرض آلى لأطياف الأصوات.ومنذ ذلك الحين أصبح علم الأكوستيكا قادرا على أن يقدم أكبر عون للباحثين فى الكلام؛فقبل ذلك كانت أمثل طريقة لإظهار الأصوات مرئية هى استخدام راسم اهتزازات يستخدم أشعة الكاثود a cothod ray oscilograph . وهو آلة تعطينا صورة لشكل الموجة بإنتاج رسم لتغيرات ضغط الهواء على شاشة مشابهة إلى حد ما لشاشة التليفزيون . ولقد استُخْدِم كأساس لكثير من الرسوم البيانية فى هذا الكتاب ولكننا قد رأينا صعوبة دراسة الأصوات بالرجوع لأشكال الموجات المركبة .والتحليلات الرياضية للمنحنيات هى وإن كانت فى الإمكان إلا أنها عملية طويلة . ولكن أصبح من الممكن الآن ـ ولم يكن ذلك ممكنا من قبل ـ أن نحصل على أطياف الأصوات باستخدام آلة تسمى راسم الطيف الصوتى sound spectrograph . *

(*) استخدام هذه الآلة مشروح بالتفصيل فى الكتاب القادم للمؤلف وهو مدخل فى الفونيطيقا التجريبية experemental phonetics وعنوانه : الكلام فى المعمل Speech in The Laboratory . (المؤلف).

وبذلك صار ممكنا أن نحقق تقدما حقيقيا فى الوصف الأكوستيكى لأصوات الكلام .



شكل (٤ - ٦) شكل موجى لا تكرارى ونرى فيه قمم الضغط تحدث مرة كل $\frac{١}{١٠٠٠}$ من الثانيــــة .

إن جميع ما سقناه من تحليلات حتى الآن إنما كان لأصوات ذات تردد محدد، غير أنه من الممكن أيضا أن نحدد أطياف الأصوات التى تكون أشكال موجاتها من النوع اللاتكرارى على نحو ما هو موضح بالشكل(٤ - ٦). فهذه الموجة يمكن تحليلها إلى عدد من النغمات النقية (والتى هى بالطبع موجات منتظمة Regular - Waves) وبطريقة تشبه إلى أبعد حد نفس الطريقة التى استُخْدِمت مع أشكال الموجات التكرارية التى عالجناها فى هذا الفصل حتى الآن .

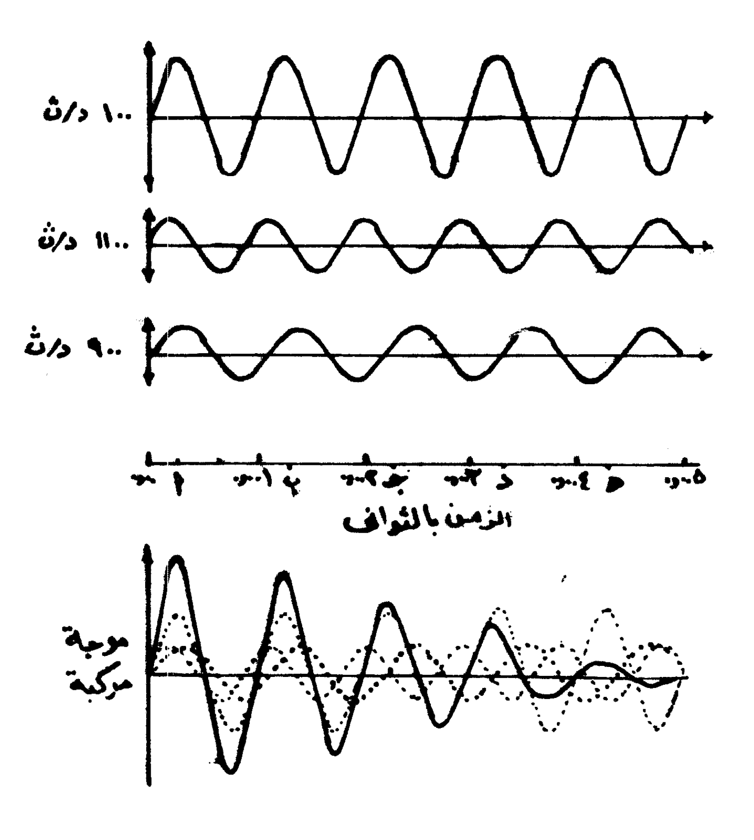
إذا فحصنا شكل الموجة فى الشكل رقم (٤ - ٦) يمكننا أن نرى أن قمم الضغط تحدث طوال استمرار الصوت مرة كل $\frac{١}{١٠٠٠}$ من الثانية. وعلى ذلك فنحن نتوقع - واثقين - أن هذا الصوت يشتمل من بين مكوناته على مكون موجى تردده يساوى ١٠٠٠ د/ث .

وكل ما يمكن أن نجده بالإضافة إلى ذلك هو بعض المكونات التي تجعل اتساع الموجة المركبة تقل شيئا فشيئا.

وينشأ عن ذلك أننا لو أضفنا إلى الموجة ذات التردد ١٠٠٠ د/ث مكونا واحدا أدنى قليلا، وآخر أعلى قليلا من حيث التردد نحصل على شئ قريب من النتيجة التى نرغبها، ويوضح الجزء العلوى من الشكل (٤ — ٧) هاتين الموجتين إلى جانب الموجة التى ترددها ١٠٠٠ د /ث . وإحدى هاتين الموجتين ترددها ٩٠٠ د/ث ، والأخرى ترددها ١١٠٠ د/ث . ويبلغ الاتساع فى كلتيهما $\frac{١}{٢}$ من اتساع الموجة التى ترددها ١٠٠٠ د/ث. وأما محصلة تركيب هذه الموجات الثلاث لمدة محدودة فيتولى الجزء السفلى من الشكل (٤ — ٧) توضيحها .

ويمكنك أن ترى من الشكل أن كلتا هاتين الموجتين فى اللحظة الزمنية (أ) تساعدان المكون الذى تردده ١٠٠٠ د/ث على أن يزيد فى الضغط ؛ ومن ثم تأتى أول قمة للضغط كبيرة إلى حد ما . وفى اللحظة (ب) تساعد كلتاهما على زيادة الضغط ولكن بدرجة ليست كبيرة ، ولذلك تأتى القمة الثانية أصغر إلى حد ما . وفى اللحظة (جـ) تلغى كلتاهما الأخرى تقريبا ، حيث يتسبب تأثيرهما معا فى إحداث زيادة ضئيلة فى قمة الضغط للموجة ذات التردد ١٠٠٠ د/ث. أما فى اللحظة (د) فإنهما تسببان انخفاضا ضئيلا فى النهاية القصوى للضغط . وهذا التأثير يزيد عند اللحظة (هـ) حينما يتسببان فى انقاص قمة الضغط بدرجة ملحوظة .

وهكذا يمكن تركيب هذه الموجات الثلاث لمدة قصيرة لكى تنتج شكلا موجيا مشابها لشكل الموجة التى نرغب فى تحليلها.



شكل (٤ ــ ٧) تركيب لموجات ترددها : ١٠٠٠ د /ث ، ١١٠٠ د/ث ، ٩٠٠ د/ث لكى تُكَوِّنَ موجةً مركبـــــــة .

وحيث أن الموجة المركبة الموضحة فى الشكل (٤ ــ ٧) تبـدو قريبة الشبه من الموجة المركبة فى الشكل (٤ ــ ٦) ،فينبغى أن يكون ممكنا وصف هذا الشكل الموجى بأن له طيفا مشابها لذلك الذى يظهر فى الشكل (٤ ــ ٨) ،أى أنه يتكون من نغمات نقية ترددها :

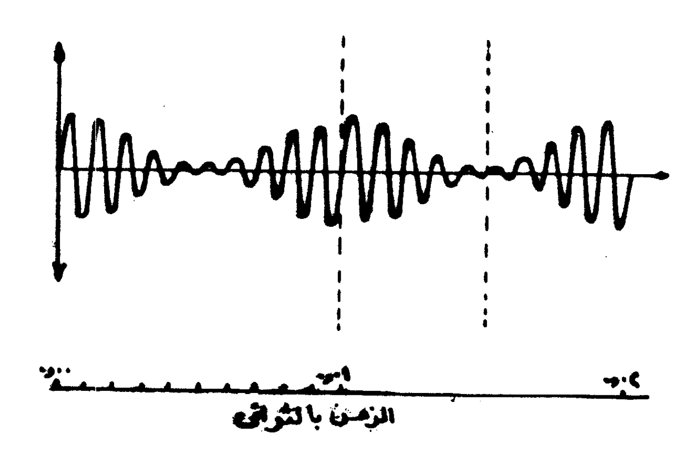
٩٠٠ د/ث ، ١٠٠٠ د/ث ، ١١٠٠ د/ث ؛ أما من حيث الاتساع فإن النغمتين ٩٠٠د/ث ، ١١٠٠ د/ث ،كلتاهما ذات اتساع يساوى $\frac{1}{2}$ اتساع النغمة ١٠٠٠ د/ث . بيد أن هذا - على أى حال - ليس صحيحا تماما ، ذلك أن الموجة المركبة فى شكل (٤ - ٧) لاتماثل الموجة المبينة فى الشكل (٤ - ٦) من كل الوجوه . فالصوت الأخير يبدأ بداية مفاجئة - من السكون تقريبا - ليفعف بعد ذلك شيئا فشيئا حتى يعود تقريبا إلى السكون تارة أخرى .



شكل (٤ - ٨) طيف الموجة المركبة فى شكل (٤-٧)

أما المكونات الموجية التى ينبغى أن تضاف معا لكى تصنع الموجة المركبة فى الشكل (٤ - ٧) فهى جميعا نغمات نقية ، أى أنه فى كل موجة منها تكون كل دورة شبيهة بالدورة التالية ،وهذه تشبه بدورها الدورة التالية لها أيضا ،وهكذا .. إلى مالا نهاية من الناحية النظرية .

ولكن إذا استمر تركيب النغمات النقية المبينة فى الشكل (٤ - ٧) بعضها مع بعض لفترة أطول ،فستستمر لكى تنتج شكلا موجيا على النحو المبين فى الشكل رقم (٤ - ٩) . فالموجة فى شكل (٤ - ٦) كانت تشبه - بشىء من التجاوز - ذلك الجزء المحصور بين الخطين المنقطين من الموجة المركبة (شكل ٤ - ٩) .

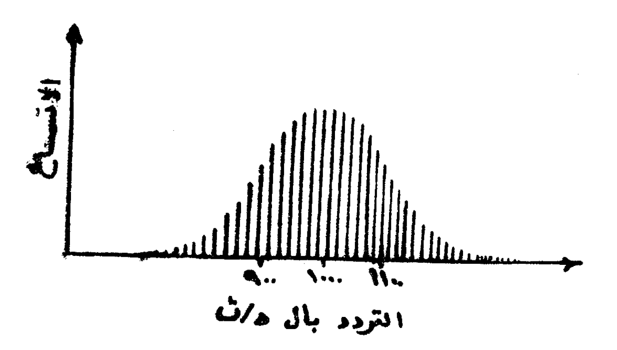


شكل (٤-٩) موجة مركبة (ذات تردد أساسى ١٠٠ د/ث) تتكون من ثلاث موجات ترددا تها : ٩٠٠ د/ث ، ١٠٠٠ د/ث، ١١٠٠ د/ث . ولم يوضح الشكل (٤-٧) إلا الجزء المحصور بين الخطين المنقطعين من تلك الموجة .

ومن ذلك نعلم أن القول بأن هذا الشكل الموجى له تكوين طيفى كالمبين فى شكل (٤-٨) ليس إلا تقريبا للحقيقة . وتحليل هذا الشكل الموجى إلى المكونات الثلاث التى تظهر فى الطيف لايعنى ادعاء منا بأننا نعتبر الصوت الذى انتقيناه للتحليل يبدأ فجأة ثم يعقبه سكون. وإذا تسامحنا فى اعتبار هذه الحقيقة سنجد أننا مطالبون بتحليل الشكل الموجى إلى عدد كبير(لانهائى فى الواقع) من المكونات . طبيعى أننا لانستطيع أن نعرض ذلك من خلال تتبع جميع هذه المكونات . ولكن يمكن بتمثيل بعضها أن نعين شكل الطيف الذى يَنْتُج عنها (شكل ٤ - ١٠) . وأكثر الطرق اعتيادا لرسم هذه المكونات رسما بيانيا هى استخدام منحنى كالمبين فى شكل (٤ -١١) . وحينما نمثل صوتا بمنحنى من هذا النوع، فإننا

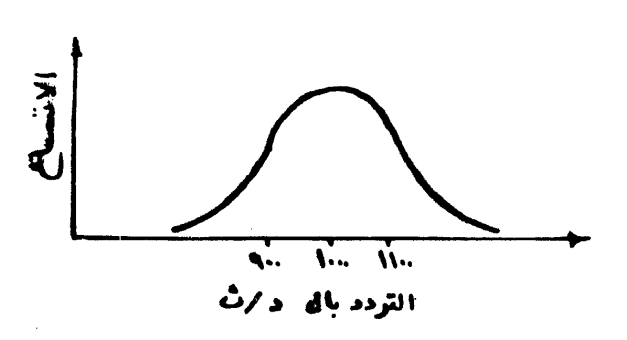
نعنى أن له موجة مركبة ذات عدد لانهائى من المكونات، وارتفاع المنحنى عند أى نقطة يمثل الاتساع النسبى للمكون الموجى عند ذلك التردد المعنى٭.

وليس من أهداف هذا الكتاب أن يعطى تفسيرا رياضيا كاملا لكى نوضح علة احتواء طيف الموجة اللاتكرارية على عدد لانهائى من المكونات • بيد أنه من الممكن أن نلاحظ - بطريقة عابرة - أن الموجة الموضحة فى شكل (٤ - ٩) تلك التى تتألف من الترددات ٩٠٠، ١٠٠٠، ١١٠٠ د/ث ،هى ذات تردد أساسى يساوى ١٠٠ د/ث، أى أنها تكرر نفسها كل $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية • ولو أن المكونات كانت : ٩٠٠ ،٩٥٠، ١٠٠٠، ١٠٥٠، ١١٠٠ د/ث ،فإن التردد الأساسى سيكون ٥٠ د/ث، إذ إن الشكل الموجى كان سيتكرر كل $\frac{١}{٥٠}$ من الثانية • وإذا أضفنا مزيدا من المكونات بحيث تكون تردداتها على سبيل المثال : ٩٠٠، ٩٠١، ٩٠٢، ٠٠٠٠، ١٠٩٦، ١٠٩٧، ١٠٩٨، ١٠٩٩، ١١٠٠ د/ث ،فسنجد أن التردد الأساسى للموجة المركبة الناتجة سيكون دورة واحدة فى الثانية • بل إن علينا - إذا أردنا أن ننتج موجة مركبة تكرر نفسها على نحو أكثر بطئا مما سبق - أن نضيف مكونات ترددية تكون أكثر اقترابا بعضها من بعض •



شكل (٤ - ١٠) رسم شديد التقريب لطيف الموجة الصوتية الموضحة فى شكل (٤ - ٦)•

واذا كان الشكل الموجى بحيث يحدث مرة واحدة فقط فى كمٍ لانهائى من الزمن ، أى أنه لايكرر نفسه أبدا،فينبغى حينئـذ أن تكون المكونات متلاصقة بعضها مع بعض تلاصقا لانهاية له [أى كثيرة العدد كثرة لانهاية لها] .



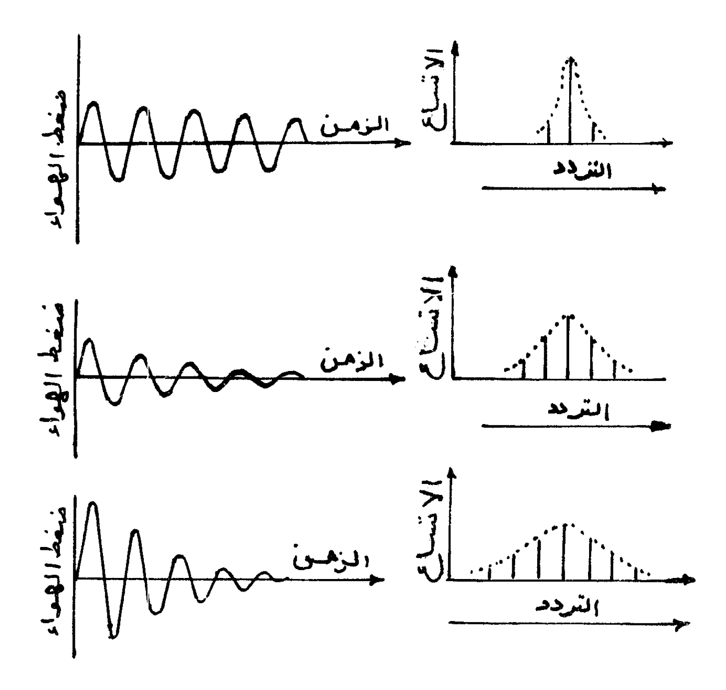
شكل (٤ - ١١) الطريقة المعتادة لتمثيل التكوين الطيفى للشكل الموجى اللاتكرارى فى شكل (٤ - ٦).

لقد أوضحنا فى نهاية الفصل السابق أن معظم الأصوات التــى تهمنا ليست بأشكال موجية لاتكرارية مسبوقة بالسكون ومتلوة بـــه، ولا هى بموجات ذات تردد تكرارى دقيق . والبديل لذلك هــو أن هذه الأصوات تتكون من موجات تشبه إلى حد ما ، ما يسبقها ومـا يلحقها من موجات،ويتوقف مقدار التشابه على المعدل الذى يتغيـر به نوعية الصوت Quality . فبعض أصوات الكلام ،مثل الصوائـت التى تستمر لوقت طويل نسبيا،تحتوى على عدد من الموجات المتتابعة تماثل بعضها بعضا على وجه التقريب . أما الأجزاء الأخرى مــن الكلمات ، مثل البداية والنهاية الفجائيتان لكلمة Pat فتتكون من أصوات تتغير أشكالها الموجية بسرعة كبيره .

وحينما نصف موجة صوتية بتحليلها إلى مكوناتها ،فنحن بين أمرين : إما أن نفترض أنها موجة واحدة تتألف من عدد لانهائي من الموجات المتماثلة (وذلك هو ما فعلناه في جميع ما قدمناه من تحليلات للموجات المركبة) ،وإما أن نفترض أنها تغيرات منعزلة في ضغط الهواء ،مسبوقة بالسكون ومتلوة به (وهو ما يقودنا - كما رأينا لتونا - إلى نتيجة فحواها أن لهذه الموجة عددا لانهائيا من المكونات). وقد جرت العادة أن نستخدم الطريقة الأولى حين نكون بصدد تحليل موجة صوتية هي واحدة من مجموعة متشابهة من الموجات المتتابعة. ويقال حينئذ إن الصوت ذو" طيف خطي" Line spectrum، أما حين تكون كل موجة مختلفة تماما عن الموجات المجاورة لها ،فمن الطبيعي أن يتم التحليل باستخدام الطريقة الثانية ،وحينئذ يقال إن الصوت ذو " طيف متصل" continous spectrum .

سبق أن ذكرنا (ص ٤٦) أن من الأنسب وضع جميع الأصوات تحت أحد نوعين ؛ النوع الأول هو أصوات تتابع أشكالها الموجية على فترات منتظمة من الزمن ،والنوع الثاني هو أصوات ذات أشكال موجية لا تكرارية. والآن نستطيع أن نرى كيف يمكن تطبيق هذا التمييز تطبيقا عمليا. إننا ننظر عادة - للصوت على إنه ذو شكل موجي تكراري في مقابل نوع آخر من الأشكال الموجية يتألف من تنوعات عشوائية في ضغط الهواء، هذا إذا كان من المناسب لنا أن نصف هذا الصوت المعني باستخدام طريقة الطيف الخطي كمقابل لطريقة الطيف المتصل. والحق أن النظرة الرياضية الدقيقة تلزمنا بأن نصف جميع الأصوات بأنها ذات أطياف متصلة ضرورة، طالما أن جميع الأصوات - إذا توخينا دقة القول - ذات أشكال موجية لاتكرارية. ولكن كثيرا من الأصوات لها أشكال موجية ذات طبيعة تكرارية دقيقة تقريبا حتى إننا لنجد من المناسب جدا وصفها باستخدام الأطياف الخطية. وحينما نحلل شكلا موجيا ذا طبيعة تكرارية تقريبا باستخدام هذه الطريقة ،نحصل على وصف

مبسط يحدد لنا تحديدا دقيقا أهم المكونات دون أن يهمل من المكونات إلا تلك التى تحتل الدرجات الدنيا من حيث الأهمية .



شكل (٤ - ١٢) موجات متنوعة يقابلها أطيافها .

يوضح شكل (٤ -١٢) تحليلا لموجات متنوعة بكلتا الطريقتين. فعلى يسار الشكل نرى ثلاث موجات مختلفة ، على حين تظهر الأطياف المناظرة لكل منها الى اليمين . وتمثل الخطوط الرأسية من الأطياف المكونات التى يمكن اعتبارها موجودة حين يكون الشكل الموجى المناظر لها مؤلفا من دورة واحدة لموجة مركبة تتكرر عددا لانهائيا من المرات وأما المنحنيات المنقطة فى الرسوم البيانية للأطياف فتمثل نتائج التحليل بالطريقة الثانية (أى باعتبار الشكل الموجى المناظر تغييرا معينا فى ضغط الهواء مسبوقا بالسكون ومتبوعا أيضا بالسكون) .

فالموجة الأولى التى يبينها الشكل هى نغمة نقية تقريبا ،حيث لايوجد إلا نقص ضئيل فى الاتساع بين أى قمة من قممها والقمة التى تليها. وعلى ذلك وكما نرى من الطيف الخطى،توجد طاقة الموجة المركبة كلها تقريبا فى مكون واحد. أما المكونات الإضافية التى ينبغى أن تُركّب معها فذات اتساعات صغيرة جدا. ونفس هذه المعلومات يمكننا أن نستقيها بطريقة أخرى من خلال" الطيف المتصل" حيث نستطيع ان ندرك من الارتفاع الحاد للمنحنى أن معظم الطاقة مركزة فى منطقة ترددية واحدة. وفى الموجة الثانية فى شكل (٤ - ١٢) نجد معدل الاضمحلال فيها أسرع إلى حد ما. ويُظهرنا طيفها الخطى على إنها تتكون من عدد أكبر من النغمات ذات اتساعات هامة ،أو أن الطاقة فيها - كما يبدو لنا من شكل المنحنى- ليست مركزة فى منطقة ترددية ضيقة. أما الموجة الثالثة فإنها تضمحل بسرعة قصوى . وهى تحتاج إلى مكونات عديدة ذات اتساعات متساوية تقريبا من أجل تكوين شكل موجى مركب من هذا النوع ،ويمكن أن يقال بعبارة أخرى إن الطاقة تتوزع فيها على مجال واسع من الترددات.

والآن نستطيع أن نفهم علة الافتراض القائل بأن الشوكة الرنانة ذات نغمة نقية تقريبا، إذ إن معدل اضمحلال الشوكة الرنانة بطىء جدا،بل إنه أكثر بطئا حتى من ذلك الاضمحلال الذى يميز الموجة الأولى فى شكل (٤ - ١٢). إذ من الممكن أن تطرق شوكة رنانة ولتكن - على سبيل المثال - من النغمة A (٤٤٠ د/ث) لكى تستمر لمدة عدة ثوان ،ومن ثم فهى تصنع عدة آلاف من الاهتزازات تشبه كل واحدة منها تقريبا الاهتزازة السابقة لها. ينشأ عن ذلك أن الشكل الموجى لأى شوكة رنانة يمكن أن يُحَلَّل إلى نغمة واحدة سائدة لايصحبها من المكونات الإضافية إلا عدد جد قليل .

أما أصوات الكلام فكثير منها يضمحل خلال بضعة أجزاء من ألف من الثانية ،ولذا فهى تشبه الموجه الثالثة التى فى الشكل

(٤ - ١٢)،ويثبت التحليل، أنها مكونة من عدد كبير من النغمات النقية ذات الاتساعات المتماثلة.

والقاعدة العامة التى ينبغى أن نتذكرها هى أن المنحنى الحاد المدبب يمثل طيف صوت ذى معدل اضمحلال بطىء،وما دامت الطاقة فى هذا الصوت مركزة فى منطقة ترددية واحدة فهو نغمة نقية على وجه التقريب . ويقابل ذلك من الوجهة الأخرى أن أى شكل موجى لاتكرارى ويكون معدل الاضمحلال فيه سريعا،يُمَثَّلُ بمنحنى أكثر انبساطا ، للدلالة على أن الطاقة التى يحتويها موزعة على مدى من الترددات أوسع .

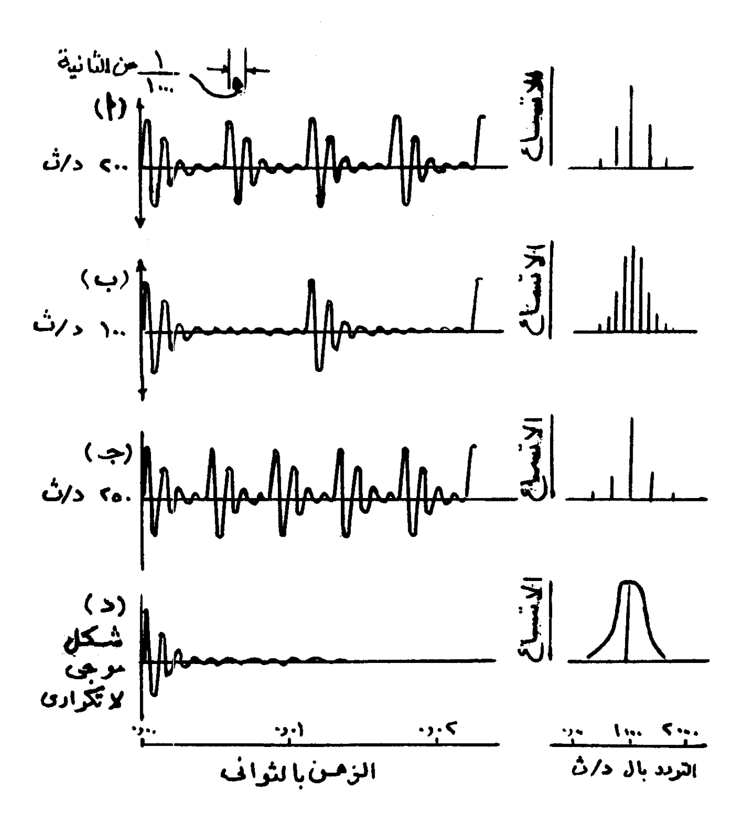
والكثير من أصوات الكلام يتكون من تكرار منتظم لدورة من دورات التغييرات الحادثة فى ضغط الهواء مشابهة إلى حد ما لتغيرات الضغط التى تم عزلها ومعالجتها.
ويبين الشكل (٤ - ١٣) على اليسار ثلاث موجات من هذا النوع (أ ، ب ، ج) بالإضافة إلى موجة رابعة هى (د) والتى يمكن اعتبارها مسبوقة ومتلوة بالسكون ،فإذا كانت هذه الموجة الرابعة تمثل الصوت الناتج عن دفقة واحدة Single tap من زجاجة ، حينئذ تصبح الموجات الأخرى ممثلة للأصوات الناتجة من سلسلة من الدفقات المتتالية على فترات منتظمة من الزمن. ولسوف نرى فيما بعد أن هذه الدفقات Taps تناظر فى أصوات الكلام الانفتاح والانغلاق المنتظمين للوترين الصوتيين .

رأينا فى موضع سابق من هذا الفصل أننا حين نحلل موجة تكرارية لكى نحصل على صورتها الطيفية الخطية ، سنجد كل المكونات ذات ترددات هى مضاعفات صحيحة للتردد الذى يتكرر به الشكل الموجى المركب ، لذلك ففى حالة الموجة (أ) فى الشكل (٤ - ١٣)،تلك التى يبلغ اتساعها غاية ذروته مرة كل $\frac{١}{٢٠٠}$ من الثانية ،تكون المكونات الممكنة هى نغمات تردداتها : ٢٠٠، ٤٠٠،

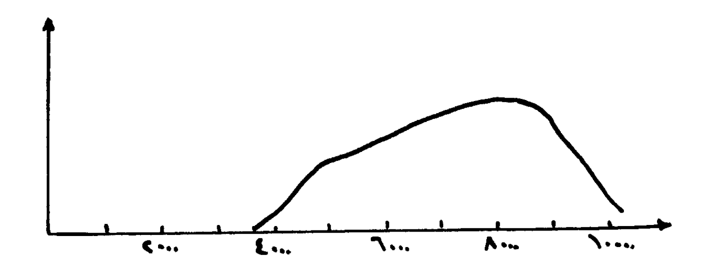
٦٠٠، ٠٠٠ د /ث ٠ ونرى على الجانب الأيمن للشكل، الطيف الفعلي لهذه الموجة ٠ فأكبر المكونات يبلغ ترددها ١٠٠٠ د/ث ،وهذا هو ما نتوقعه لها على وجه اليقين ، ذلك أننا نستطيع أن نرى بلمحة سريعة أن قمم الضغط الصغيرة فى الموجة (أ) تتابع مرة كل $\frac{١}{١٠٠٠}$ من الثانية ٠ وكذلك تتوالى قمم الضغط المماثلة فى فى الموجة (د) كل $\frac{١}{١٠٠٠}$ من الثانية٠ غير أننا مادمنا قد اعتبرنا أن هذه الموجة مسبوقة ومتلوة بالسكون ،فإن علينا أن نحللها باستخدام وسيلة الطيف المتصل ٠ وفى هذا الطيف كما فى طيف الموجة (أ) تماما نجد أن أكبر المكونات حظا من الاتساع يبلغ ترددها ١٠٠٠ د/ث ٠ وهناك بالإضافة إلى ذلك أوجه شبه أخرى بين طيفى هاتين الموجتين ، ذلك أن الاتساعات النسبية التى تميز المكونات فى طيف الموجة (أ) ،هى على وجه الدقة نفس الاتساعات النسبية التى تميز المكونات المناظرة فى الموجة (د)٠

وهكذا يبلغ اتساع المكون الموجى الذى تردده ٨٠٠ د/ث $\frac{١}{٢}$ اتساع المكون الموجى الذى تردده ١٠٠٠ د/ث فى كل حالة ،كما أن المكونات الموجية التى ترددها ٦٠٠ د/ث هى فى كلا الطيفين صغيرة جدا٠

وإذا تأملنا الموجتين(ب) ،(ج) فى شكل (٤ - ١٣) سنجد أن طيفيهما هما أيضا - إلى حد ما - مشابهان لطيف الموجة (د) ٠ فالموجة (ب) هى شكل موجى مركب يتكرر كل $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية ، وكذلك الموجة (ج) هى شكل موجى مركب مشابه يتتابع ٢٥٠ مرة فى الثانية ٠

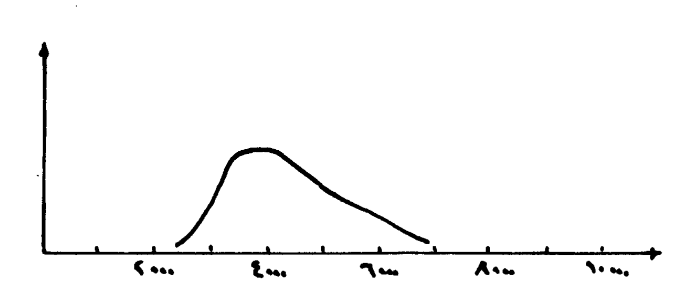


شكل (٤ - ١٣) بعض موجات متنوعـــة مع أطيافها .



شكل (٤ – ١٤ أ) طيف الصوت الحادث فى نهاية كلمة : Hiss .

فى هذا الشكل وما يلى من أشكال طيفية سيبين البعد الأفقى التردد مقيسا بالدورة الثانية ، أما البعد الرأسى فيبين الاتساع النسبى للمكونات .



شكل (٤ – ١٤ ب) طيف الصوت الحادث فى نهاية كلمة : Hush .

وينشأ عن ذلك أن المكونات هى فى أطيافها مضاعفات للعدد ١٠٠ فى حالة الموجة (ب) ،والعدد ٢٥٠ فى حالة الموجة (جـ). كذلك تُشَابِهُ كلتا هاتين الموجتين الموجة (أ) فى احتوائهما على قمم من الضغط تتابع بحيث يتناقص اتساعها كل $\frac{١}{١٠٠٠}$ من الثانية .

وعلى ذلك فالمكونات التى تحظى أطيافها بأكبر الاتساعات إنما تكون عند التردد ١٠٠٠ د/ث . ونلاحظ كما فى الموجة (أ) أن كل المكونات الأخرى الموجودة، لها نفس الاتساعات النسبية التى فى طيف الموجة (د) . ونستطيع أن نرسم منحنى مماثلا يحيط بطيف كل من الموجات (أ) ،(ب) و (ج) . بل إن هذا المنحنى له نفس شكل طيف الموجة (د) والذى هو حدوث منعزل لصورة موجية تشبه الأشكال الموجية التكرارية الموجودة فى كل موجة من الموجات الأخرى. هذه النتيجة ستكون ذات أهمية لنا حينما نأتى لنبحث العلة فى بقاء النوعية الفونيطيقية phonetic quality للصوت على ما هى عليه ،بالرغم من التغيرات التى تحدث فى الدرجة والتى تتوقف بطبيعة الحال على التردد الأساسى .

ويمكن أن ننهى هذا الفصل بأن نعتبر المكونات التى علينا أن نؤلف بينها لتشكل صور الموجات غير المنتظمة Irregular wave Forms هى تلك المكونات التى ترد خلال الأصوات الواقعة فى نهاية الكلمتين hiss و hush . إنك إذا أصغيت إلى هذين الصوتين سيتناهى إلى سمعك أن كليهما يحمل نوعا ما من الإحساس بدرجة الصوت Pitch،وتنتشر الطاقة فى كلا الصوتين على مجال واسع من الترددات ،ولكن هذه الطاقة لاتتوزع فى أى من هاتين الحالتين على المكونات الترددية فيهما توزيعا يتصف بكمال الانتظام . ويظهر لنا الشكل (٤ - ١٤) طيفى هذين الصوتين. وإذا تأملنا الصوت الواقع فى نهاية الكلمة hiss وجدنا أن المكونات الترددية التى تشتمل على أى اتساع له قيمته إنما تقع جميعها فوق التردد ٦٦٠٠ د/ث . أما الصوت الواقع فى نهاية الكلمة hush فإن كمية كبيرة من طاقته تتوزع على المكونات الترددية فيه التى تبدأ تقريبا من التردد ٣٠٠٠ د/ث إلى حوالى ٤٥٠٠ د/ث .ومن ثم يدرك السمع هذا الصوت على إنه أقل هذين الصوتين من حيث الدرجة .

الفصل الخامس

الرنين

كان اهتمامنا فى الفصول القليلة السابقة منصرفا إلى تحليل الموجات الصوتية أكثر منه إلى انتاج هذه الموجات، وعلينا الآن أن نلتفت إلى بعض ما تتصف به مصادر الأصوات من صفات .

كل مصادر الصوت هى أجسام متحركة وبعضها مثل الشوكات الرنانة وأوتار البيان، لها ميل طبيعى للاهتزاز. وتأخذ مثل هذه الأجسام فى الاهتزاز بمجرد طرقها وهو اهتزاز يتم بمعدل محدد (أو بتردد محدد) لمدة معينة. أما مصادر الصوت الأخرى مثل الطبول وسطوح المناضد فلها ميل للاهتزاز أقل. إذ تُصْدِرُ لدى طرقها ضجيجا، ولكن الاهتزاز فيها يضمحل بسرعة ملحوظة. أما باقى المصادر الأخرى مثل سماعات التليفون ومكبرات الصوت، فليس لاهتزازها فى حقيقة الأمر تردد طبيعى. فكل حركة تقوم بها سواء إلى الخلف أو الأمام محكومة بالتيارات الكهربائية [لا بطبيعة المادة التى تتشكل منها].

ومن الممكن - بطبيعة الحال - أن نجعل جسما مهتزا يسبب الاهتزاز فى جسم آخر. ذلكم هو ما يحدث عندما نضع قاعدة الشوكة أثناء رنينها على المنضدة، أما إذا طَرَقْتَ شوكة رنانة ثم أمسكتها بيدك أثناء اهتزازها فإنها لاتُصْدِرُ إلا صوتا خافتا. بيد أن الصوت يصبح أكثر علوا بمجرد وضعنا لقاعدة الشوكة على المنضدة. ولايمكن أن تنشأ عن تحركات الشوكة تغيرات كبيرة فى ضغط الهواء نظرا لما يتصف به ذراعا الشوكة من صغر نسبى . ومن ثم فإن الهواء بدلا من أن ينضغط يتحرك فى سهولة حول ذراعى الشوكة. أما حين توضع قاعدة الشوكة على منضدة ، فإن اهتزازات الشوكة تنتقل إلى المنضدة، فتهتز المنضدة حينئذ فتتأثر باهتزازها كمية من الهواء أكبر. فالطاقة التى تنشرها الشوكة فى اهتزازاتها تتحول بطريقة

يتزايد تأثيرها إلى موجات صوتية بفضل ما للمنضدة من سطح مستو كبير.

ويُستَخدَمُ هذا المبدأ فى آلات موسيقية كثيرة ،وذلك أن أى وتر مهتزلا يصنع بنفسه تأثيرات كبيرة جدا فى الهواء. ولكن إذا تأملنا ما يحدث فى آلتى البيان والكمان حيث تعمل اهتزازات الأوتار على تحريك لوحة التصويت فى البيان أو على تحريك جسم الكمان فيستنتج عن ذلك أن تزداد الأصوات علوا . بيد أن علينا أن نلحظ أن اهتزاز لوحة التصويت أو جسم الكمان ،لايمكن أن يتم بنفس الطريقة التى تهتز بها الأوتار المحرِّكة لهما، إذ إن كلا منهما - إلى حد ما- يُؤثِّرُ نمطا طبيعيا من الاهتزاز يختص به.

ومن المألوف لنا جميعا أن نجد- غير الآلات الموسيقية- كثيرا من الأشياء ذات القابلية للاهتزاز عند ترددات محددة. فالكئوس وأصص الأزهار [الفازات] وأشياء أخرى كثيرة سوف تعطينا نغمة مسموعة إذا ما طُرِقت، كما إننا نعرف يقينا أن هذه الأشياء سترد الرنين أيضا إذا ما عُزِفت النغمة المناسبة لتردداتها على البيان، إن الكأس الزجاجية يمكن حملها على الرنين بعزف نغمة مناسبة. وكثيرا ما يقال إن محترفى الغناء الأوبرالى القادرين على أداء نغمة مناسبة بدرجة كبيرة من العلو والصفاء ،فى استطاعتهم أن يحملوا كأسا زجاجية على أن تهتز اهتزازا شديدا حتى إنها لتتهشم من تلقاء نفسها.

ويمكن توضيح هذا النوع من الظواهر بمثال أكثرَ بساطة وذلك باستخدام شوكتين رنانتين متماثلتين. فإذا طُرِقَتْ إحدى الشوكتين ثم قُرِّبَتْ من شوكة أخرى بحيث يكون ترددها الطبيعى عند الاهتزاز مماثلا للأولى ،فإن الشوكة الثانية تبدأ فى الاهتزاز.ومن الطبيعى أن تُنشِئ الشوكة الثانية فور شروعها فى الحركة موجة صوتية

بالطريقة المعتادة ،بل إننا إذا أوقفنا الشوكة الأولى بلمسها بأحد الأصابع ،سنلحظ أن الشوكة الثانية- مادامت قد شرعت في الحركة - ستستمر فى الاهتزاز إلى أن تخلد إلى السكون من تلقاء نفسها. وهذه الظاهرة التى يمكن بها لأحد الاجسام أن ينطلق في الحركة بسبب اهتزاز جسم آخر تعرف بالرنين resonance .وحينئذ يقال للجسم الأول إنه يقوم بدور المرنان (١) للجسم الآخر وبعبارة أخرى يرنّ to resonate الجسم الآخر .

ومن أسهل السهل أن نفهم كيف يحدث الرنين فى حالة شوكتين رنانتين ، فحينما تُطَرّقُ الشوكة الأولى تهتز مسببة تغيرات في ضغط الهواء تنتشر بعيدا. وهذه التغيرات فى الضغط - كما رأينا- هى نتيجة تحركات طفيفة تقوم بها جزيئات الهواء. وحينما تحدث تغيرات الضغط بجوار الشوكة الثانية ستهتز جزيئات الهواء بطريقة تشبه إلى حد كبير تلك الطريقة التى تهتز بها الشوكة الأصلية ،وهذه التحركات تُحدث سلسلة من الدفعات الصغيرة على الشوكة الثانية فتبدأ فى الحركة نتيجة لذلك .

ومن الأهمية بمكان أن نلحظ أن الشوكة الثانية لاتبدأ في إصدار الصوت عاليا بمجرد طرق الشوكة الأولى ،بل إنها تستغرق كمّا محددا من الزمان الى أن تتجمع الاهتزازات وتصل إلى أقصى

---

(١) استخدمت كلمة (مِرنان) مقابلا عربيا للمصطلح الانجليزى resonator . وقد شاعت ترجمته " بالجسم الرنان" ولكنى آثرت هذه الترجمة لأنها على صيغة (مِفْعَال) وهى صيغة عربية تستخدم غالبا فى أسماء الآلات مثل : مفتاح - مثقاب - محراث - محراب مرآة - مشكاة .. الخ وهو ما يلائم حالتنا هذه.فلا داعى لترجمة الكلمة بكلمتين مادامت العربية تتسع لترجمتها بكلمة واحدة. (المترجم) .

غاياتها. ذلك أن جزيئات الهواء تتحرك بطريقة ينتج عنها أن كل حركة إلى خلف أو إلى أمام تعمل كضربة صغيرة يضاف تأثيرها لتأثير الضربة السابقة . ولأن التردد الطبيعى للاهتزاز فى الشوكتين الرنانتين واحد،فإن كل ضربة من هذه الضربات الصغيرة تصل بكل دقة وفى اللحظة المناسبة بحيث تضيف مزيدا من التأثيرات على كمية الاهتزاز الكلية.

وربما يمكن أن نجعل ذلك أكثر وضوحا إذا اعتبرنا حالة مشابهة هى أكثر ألفة بالنسبة لنا . لنفترض أنك أردت أن تُأرجِحَ طفلا على الأرجوحة ، فإنك تبدأ باعطائه دفعة خفيفة لكى تتحرك الأرجوحة بعيدا عنك . وحينئذ وحينما تتأرجح راجعة فى اتجاهك مرة ثانية وتصل إلى أعلى منحناها فإنك تعطيها دفعة خفيفة ثانية ،وسوف يزيد ذلك من اتساع الارجحة. وبدفعة أخرى صغيرة فى المرة التالية تجعل حركة الأرجحة بالنسبة للطفل أكثر علوا. وهكذا يمكنك بعدد من الدفعات الصغيرة أن تزيد من حركة الأرجوحة زيادة كبيرة. ولكن كل ذلك يتوقف على توقيت الدفعات أو الضربات الصغيرة . فإذا حاولت أن تعطى الدفعة الإضافية الصغيرة للأرجوحة وهى فى طريق عودتها إليك (٢) فلن تعينها على زيادة الحركة بل ستبطىء بها. ولايمكن لدفعتك أن تحقق أعظم تأثير لها إلا بأن تنتظر حتى توشك الأرجوحة أن تبتعد عنك . وهذا هو الموقف مع الشوكتين الرنانتين المتماثلتين. فالضربة الصغيرة الأولى توصل حركة ضئيلة جدا للشوكة الرنانة . ولكن هذه الشوكة وقد تحركت من موضع سكونها ،تتحرك إلى الخلف ثانية بنفس معدل اهتزازها الطبيعى ،ولا تكاد تبدأ أرجحة ثانية حتى تحدث لها الضربة الثانية . هذه الضربة وجميع ما يليها من ضربات تالية تساعد فى إحداث اهتزازات كبيرة. بيد أنه من الواضح أن الشوكة الثانية لن تهتز إلا فى حالة وصول الضربات إليها فى اللحظات المناسبة. وذلكم هو ما سوف يحدث حينما تكون معدلات الاهتزاز الطبيعية (أو الترددات) للشوكتين الرنانتين واحدة.

---

(٢) أى قبل وصولها لأعلى نقطة فى الأرجحة . (المترجم)

ويمكننا الآن أن ننتقل إلى حالات من الرنين أكثر تعقيدا ، وذلك مثل كأس يرن حينما تُعْزَفُ النغمة المناسبة على البيان. إن نفس المبدأ - أساسا - موجود فى هذه العملية ، فالبيان يسبب حركات جزيئات الهواء ، وهذه الحركات تحمل الكأس على الاهتزاز وقد رأينا فى الفصل الأخير ، أن الموجة الصوتية التى أنتجها البيان تكون ذات شكل مركب complex form. ويوضح الطيف (شكل ٤-٤) أنها كانت تتكون من نغمة أساسية واحدة مع عدد ضخم من التوافقيات التى يتمتع بعضها بكمية كافية من القوة. فإذا كان لإحدى هذه المكونات تردد مساو لمعدل الاهتزاز الطبيعى التى للكأس ، فقد يكون قادرا على أن يسبب تحركات الهواء التى تحمل الكأس على الاهتزاز .

وقد يبدو أول وهلة أنه من الصعب أن نقتنع بأن الموجات الصوتية الصادرة من البيان هى فى الواقع مساوية لعددٍ من الموجات البسيطة . ولكن هذا هو ما يحدث فى الحقيقة. وربما يزداد الأمر وضوحا إذا استخدمنا لشرحه مثالا يقوم على الأرقام؛ فلنفترض أن لدينا كأسا تردد اهتزازه الطبيعى هو : ١٠٤٦ د/ث فإذا ما عُزِفت نغمة على البيان لها هذا التردد (سىّ) فإن الكأس سوف تبدأ فى الاهتزاز ولكنها سوف تهتز أيضا حينما تُعزَفُ النغمة (سىَ) (٥٢٣ د/ث) . إذ إن نغمة البيان التى لها هذا التردد تحتوى على توافقية ثانية قوية ، أى مُكَوِّنٌ تردده ٢ × ٥٢٣ د/ث . ولهذا السبب فسوف تكون هناك حركات لجزيئات الهواء مؤقتة توقيتا مناسبا بحيث تحمل الكأس على أن يبدأ فى الاهتزاز. وحركات جزيئات الهواء المناظرة للتردد الأساسى الذى يساوى ٥٢٣ د/ث سوف يُقَوِّى ويُضْعِفُ بالتبادل هذه الحركات (٣) وسوف يفعل تماما مثل الكثير من الترددات الأخرى.

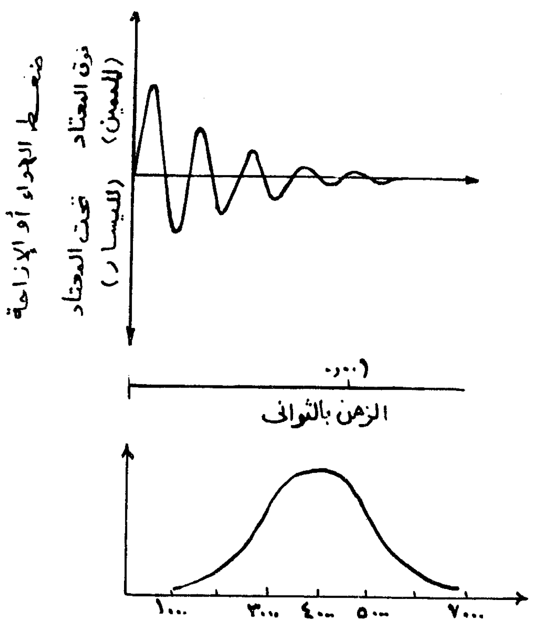
---

(٣) أى أن تأثيره الإيجابى على الكأس سوف يتساوى مع تأثيره السلبى عليها فتكون المحصلة صفرا . (المترجم).

وأيضا لن يكون للتوافقيات العليا أى تأثير مفاد ملموس، ونتيجة لذلك سوف تشرع الكأس فى الاهتزاز بترددها الخاص وهو ما يساوى التوافقية الثانية .

فى الفصول السابقة رأينا أن الصوت يتكون أساسا من تغيرات فى ضغط الهواء راجعة إلى التحركات الصغيرة لجزيئاته، التى هى بدورها نتيجة لحركات مصدر الصوت، ومن ثم فإن أى رسم بيانى لموجة صوتية كالذى يظهر فى الشكل (٥ - ١) يمكن أن يُعتبر تمثيلا للتغيرات الحادثة فى ضغط الهواء أو لحركات مصدر الصوت، ويقال مثل ذلك فى الطيف المناظر لذلك الرسم البيانى ، إذ يعطينا هذا الطيف بيانا بالمكونات التى علينا أن نستخدمها إذا أردنا أن ننشىء موجة مركبة ،كما يمدنا أيضا بوصف لترددات الاهتزاز الطبيعى لمصدر الصوت .

وهذه الترددات هى بطبيعة الحال نفس الترددات التى سوف يستجيب لها مصدر الصوت حينما يعمل كمرنان resonator. لذلك فنحن نرى أن الشكل (٥ - ١) يمكن النظر إليه باعتبارين:فهو لايكتفى بأن يُرينا تكوين الموجة المركبة المنبعثة من الجسم ،بل يُرينا أيضا الترددات التى يَرِنّ الجسم عندها على نحو أكثر سهولة ويسرا . وفى هذه الحالة يستجيب الجسم أفضل استجابة إلى الترددات الواقعة حول ٤٠٠٠ د/ث (وهى المكونة الرئيسية فى الموجة المركبة) ،وسوف يتأثر قليلا بالترددات الواقعة حول ٣٠٠٠ ، ٥٠٠٠ د/ث (وهما المنطقتان الداخلتان فى تكوين الموجة المركبة واللتان تحتويان على مكونات أصغر إلى حد ما) ولكنها قد لا تستجيب بالمرة للترددات الواقعة فوق ٧٠٠٠ د/ث وتحت ١٠٠٠ د/ث (وهما المنطقتان اللتان لاتكادان تحتويان على أى طاقة فى الموجة المركبة). وهذا المبدأ ينطبق على كل مصادر الأصوات . فالأطياف التى تَنتج عن الأصوات حينما تكون واقعة تحت تأثير اهتزازات حرة ،هى أيضا بَيان بالترددات التى سوف يستجيب الجسم اليها.



شكل (٥ ـ١) الجزء العلوى من الشكل هو رسم بيانى لموجة صوتية (وكذلك لحركات مصدر الصوت الذى أنتج الموجة الصوتية)والجزء السفلى من الشكل هو طيف هذه الموجة الصوتية (وكذلك لحركات مصدر الصوت)٠

ونزيد هذه الظاهرة توضيحا بمثال جديد٠ فلنفترض أن لدينا شوكة رنانة وأن طيفها هو منحنى ذو قمة حادة٠ إن ذلك يشير ـ كما رأينا فى الفصل السابق ـ إلى أن كل الطاقة مركز فى منطقة ترددية ضيقة واحدة ،أى إنها نغمة نقية تقريبا٠وعلى ذلك فإن مثل هذه الشوكة الرنانة سوف ترن فقط استجابة لموجة صوتية تحتوى على هذا التردد٠ ولقد رأينا أن من خصائص الطيف إذا كان حاد القمة أن يعتبر مؤشرا دالا على مصدر صوت يستغرق وقتا طويلا قبل أن يضمحل٠ كذلك رأينا الشوكة الرنانة حين تقوم بوظيفة المرنان [illegible] ـ وربما ترن بتأثير شوكة رنانة أخرى

بالطريقة التى فرغنا لتونا من شرحها – تستغرق وقتا طويلا نسبيا لكى تصل اهتزازاتها إلى ذروتها.

إذا عمدنا إلى شوكة رنانة فجعلنا اهتزازاتها تضمحل بسرعة أكثر ،ربما بأن نلمسها لمسا رفيقا بقطعة من القطن أو الصوف، فإننا بذلك نغير نوعية الموجة الصوتية التى تصدرها،كما أننا فوق ذلك نغير الطريقة التى سوف تستجيب بها حينما تعمل كمرنان. ولقد رأينا فى نهاية الفصل الرابع أن الأصوات التى يكون معدل اضمحلالها أسرع ، تتوزع طاقتها على مجال من الترددات أوسع . والشوكة الرنانة التى تكون اهتزازاتها عرضة لاضمحلال أسرع، سوف تنتج موجة مركبة تشتمل على عدد من المكونات الترددية . وصحيح أيضا بنفس الدرجة أنها سوف ترن إذا وجدت فى محضر أىٍّ من هذه الترددات .

ومصدر الصوت الذى تتلاشى اهتزازاته بسرعة يقال عنه إنه مضمحل damped . والشكل الموجى اللاتكرارى والذى يخمد بسرعة شديدة ،يسمى صوتا " شديد الاضمحلال" highly damped sound ولوحة التصويت فى البيان وكذلك جسم الكمان ،هما مثالان للمرانين المضمحلة : damped resonators . أما الشوكات الرنانة فنحن نعدها – لأسباب عملية – مصادر غير مضمحلة للأصوات (وإن كانت توجد – من الناحية النظرية – المقاومة الخفيفة التى يقوم بها الهواء وغيره من قوى الاحتكاك الأخرى مما يتسبب فى تلاشى الاهتزازات، وهذا كله ما ينبغى اعتباره من القوى المنتجة للاضمحلال).

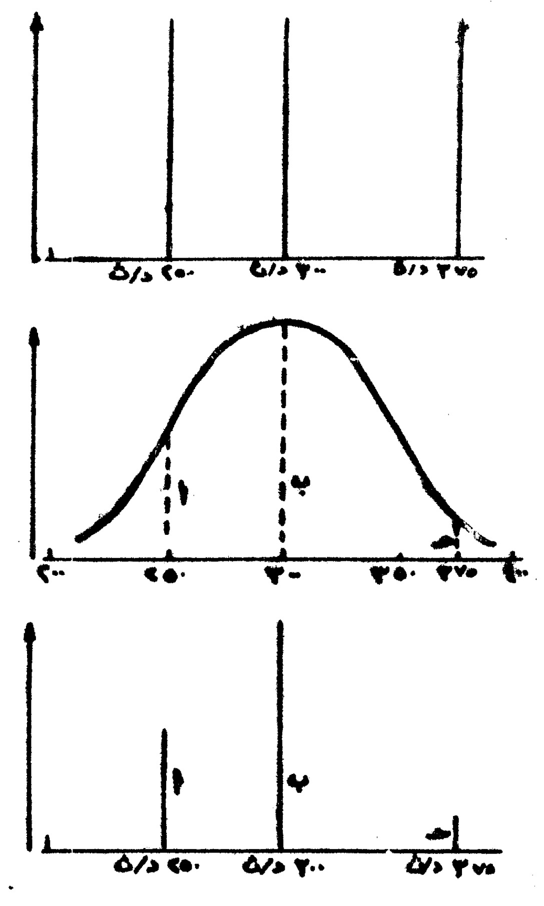
والآن يمكننا أن نعيد صياغة نتائجنا عن المرانين فى شكل آخر كالاتى :–

المرانين المضمحلة والتى تنمو اهتزازاتها وتخمد بسرعة ،يمكن حملها على الحركة بواسطة نطاق واسع من الترددات أى إنها تُمَثِّلُ

بمنحنيات منبسطة flat curves . أما المرانين غير المضمحلة فإنها تحتاج وقتا أطول لكي تنمو اهتزازاتها ثم تضمحل بعد ذلك ،ولا يمكن حملها على الحركة إلا باستخدام نطاق محدود من الترددات.أى إنها تُمَثِّلُ بمنحنيات حادة القمة sharply peaked curves .

ويطلق على المنحنى الذى يبين الطريقة التى سوف يهتز بها المرنان استجابة لأى تردد يتعرض له مصطلح" منحنى الرنين " resonance curve . ولكي نستطيعَ أن نرى نوعية المعلومات التى تظهرنا عليها هذه المنحنيات ،يمكننا أن نتخذ مثلا حالة مرنان ضئيل الاضمحلال slightly damped ،ومنحناه مبين بالشكل (٥ - ٢) وهذا المنحنى هو بطبيعة الحال تبيان أيضا للموجة المركبة والتى سوف تصدر من المرنان) . ولنفترض الآن أننا أصدرنا ثلاث نغمات نقية بالترددات الآتية : ٢٥٠ د/ث ، ٣٠٠ د /ث ، ٣٧٥ د/ث ،ولكنها جميعا ذات اتساع واحد(أى إنها جميعا لها نفس حجم النهايات العظمى للضغط). إن المرنان سوف ينطلق للاهتزاز بواسطة كل من هذه النغمات ،ولكنه يفضل أن يهتز عند التردد ٣٠٠ د / ث . ونتيجة لذلك ستسبب النغمة ذات التردد ٣٠٠ د/ث أكبر اهتزازات ،ويمكن أن يمثل الخط (ب) حجم أو اتساع الاهتزازات التى سيصنعها المرنان استجابة لهذه النغمة. وعلى الرغم من أن النغمة ذات التردد ٢٥٠ د/ث لها نفس الاتساع الذى للنغمة ذات التردد ٣٠٠ د/ث ،فإنها لن تسبب مثل هذه الاهتزازات الكبيرة مادام ترددها ليس هو التردد المفضل للمرنان ،وحينما ينطلق المرنان فى الحركة بالنغمة ذات التردد ٢٥٠ د/ث فإنه سوف يهتز باتساع يمثله الخط (أ) ، وهو يتناسب مع حجم النغمة ذات التردد ٢٥٠ د/ث فى موجتها المركبة. وبالمثل فنحن نستطيع أن نستنبط من المنحنى حجم الاهتزازات التى سيصنعها المرنان حينما ينطلق فى الحركة بواسطة النغمة ذات التردد ٣٧٥ د/ث .





الشكل (٥ -٢) حينما نعمد إلى ثلاث نغمات نقية ذات ترددات واتساعات على النحو المبين فى القسم العلوى من الرسم فنخضعها منفصلة لمنظومة ذات منحنى رنين على النحو المبين فى الجزء الأوسط من الشكل، حينئذ ستهتز المنظومة بالترددات والاتساعات المبينة فى القسم الأسفل من الشكل .

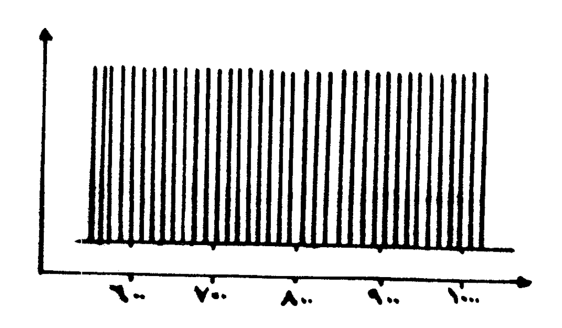
فالمرنان ليس له ميل طبيعي لأن يهتز عند هذا التردد، إذ إن المكون ٣٧٥ د/ث ذو اتساع صغير جدا فى موجته المركبة. ومن ثم فإن النغمة ذات التردد ٣٧٥ د/ث لن تسبب إلا بعض الاهتزازات الصغيرة المرنان وتمثل اتساعاتها بالخط القصير (ج). فحجم اهتزازات المرنان عند أى تردد سوف يتوقف على القدر الذى يوجد به هذا التردد فى موجته المركبة. وهذا هو ما يُقْصَدُ بقولنا إن منحنى الرنين لجسم ما ،له نفس شكل طيف هذا الجسم. (٤)

فالمرنان الذى يُرَى منحناه فى الشكل (٥ – ٢)، يمكنه أن ينطلق فى الاهتزاز بكفاءة بواسطة نغمات ذات ترددات تبدأ من حوالى ٢٥٠ د/ث الى ٣٥٠ د/ث. ويقارَن ذلك بمنحنى الرنين المبين فى الشكل (٥ – ١) الذى يشير إلى مرنان سيستجيب بكفاءة لمجال من الترددات أوسع بكثير – أى من حوالى ٣٠٠٠ د /ث إلى حوالى ٥٠٠٠ د/ث. ومن الضرورى – غالبا – فى الأكوستيكا أن يحدد مجال الترددات التى يمكنها أن تسبب الاهتزازات للمرنان ،وأنت تستطيع – إذا شئت – أن تعتبر ذلك مقياسا من نوع ما لحساسية أى مرنان. فقد تكون شوكة رنانة حساسة لمدى ضيق جدا من الترددات، على حين يمكن لمرنان مضمحل ان ينطلق فى الحركة بواسطة مجال اكثر اتساعا. ولكنه من الصعب أن نعطى مواصفات دقيقة لحزمة الترددات band of frequencies التى يمكن أن تستخدم لتحمل مرنانا على الاهتزاز وذلك بسبب الطريقة التى تتلاشى بها منحنيات الرنين. والمرنان الذى عالجناه فى الفقرة السابقة على سبيل المثال ،يمكنه أن ينطلق فى الحركة بترددات من ٣٧٥ د/ث ،ولكن اهتزازاته التى يقوم بها استجابة للترددات الواقعة فى هذا المجال سوف تكون صغيرة جدا ،ويمكن إهمالها فى معظم الأغراض العملية.

---

(٤) المقصود طيف الصوت الصادر من هذا الجسم حينما يهتز. (المترجم).

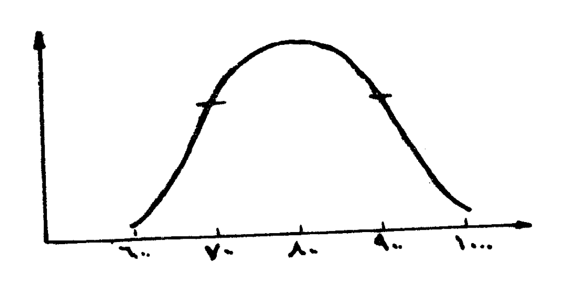
والأصوات التى نستخدمها لكى نحاول أن نجعل بها مرناننا يبدأ فى العمل ، يطلق عليها" مُدْخل المِرْنان " input .أما الطريقة التى يهتز بها المِرْنان استجابة لهذه الأصوات فتعرف " بالمُخْـرَج" output من مدخل معين ، ولنفترض الآن أن المُدخل لمِرنان ما يتكون من عدد كبير من النغمات،وكلها ذات اتساعات متساوية . مثل ذلك المدخل يمكن أن يمثل بالطيف المبين فى الشكل (٥ - ٣).فإذا



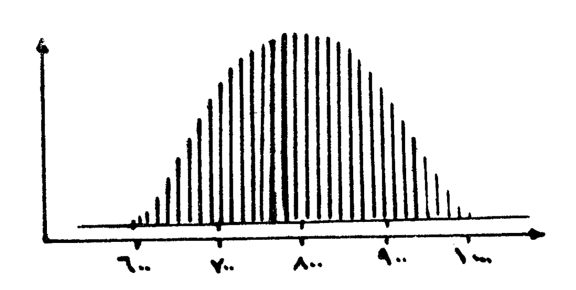
شكل (٥ - ٣) طيف صوت يتكون من عددكبير من النغمات التى لها نفس الاتساع.

كان منحنى المرنان موضع الدراسة ذا قيمة قدرها ٨٠٠ د/ث كما نرى فى شكل (٥ - ٤) فإن المُخرج الخاص به سوف يكون صوتا ذا طيف يبينه الشكل (٥ - ٥) ،وسوف يَرِنُّ بأعلى كفاءة للنغمة ذات التردد ٨٠٠ د/ث (والتى تُعرف بالتردد المُرِنّ resonant Frequency)، ويكف ... اءات تتناقص بالنسبة للنغمات الواقعة على كلا جانبى هذا التردد.

ومن بين الطرق المتفق عليها لتحديد مجال التردد الذى يستجيب المرنان خلاله بكفاءة ،هو أن نحدد الترددين اللذين يبلغ

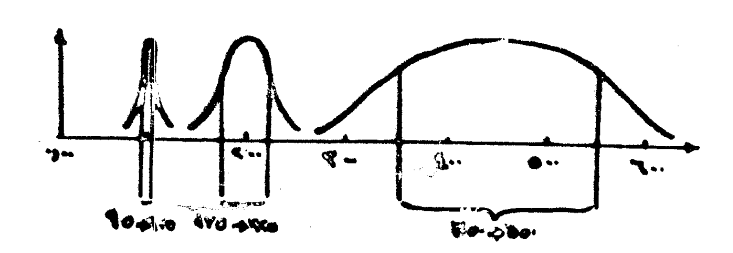


شكل (٥ – ٤) منحنى يصف حدود مرنان



شكل (٥ – ٥) المخرج output من المرنان الذى فى الشكل (٥ –٤) عند تمرير المُدخل المبين بالشكل (٥ – ٣) فيه.

عندهما اتساعا المُخرج ٧ر٧٠ ٪ * من التَردد المُخرج عندما سميناه " بالتردد المُرنّ resonant Frequency . وبالنسبة للمرنان موضع الدراسة فإن المُخرج عند ٧٠٠ د/ث ،وعند ٩٠٠ د / ث سوف يكون ٧ر٧٠ ٪ من المخرج عند ٨٠٠ د / ث على الرغم من أن المدخلات عند هذه الترددات الثلاث كانت جميعها [قبل تمريرها فى منحنى الرنين] ذات اتساعات واحدة . وطبقا لذلك يمكننا أن نفترض أن هذا المرنان يكون كفئا خلال هذا المدى . وإذن فإن أى تردد يقع بين ٧٠٠ د/ث ، ٩٠٠ د/ث سوف يُطلق الاهتزازات التى ستبلغ اتساعاتها على الأقل ٧٠٧ ر. من اتساع الاهتزازات الناتجة من نغمة ترددها ٨٠٠ د/ث بحيث تكون مساوية لها فى القوة .



شكل(٥ ـ ٦) منحنيات تبين ثلاثة مرانين مختلفة ، تختلف فيما بينها من حيث الترددالمركزى ومن حيث عرض الحزام الرنينى

ويُعرّف مجال التردد الكفء effective Frequency range لأى مرنان بعرض الحزام band width . ونشاهد فى الشكل(٥ ـ ٦)

---

* سوف يظهر السبب فى اختيار هذه القيمة بالذات فيما بعد انظر ص (١١٢) . (المؤلف) .

رسوما بيانية لعددمن المرانين تبلغ عروض أحزمتها ١٠ دورات(من ٩٥ إلى ١٠٥ د/ث) ، ٥٠ دورة (من ١٧٥ إلى ٢٢٥ د/ث)، ٢٠٠ دورة (من ٣٥٠ إلى ٥٥٠ د/ث ، ويمكنك أن ترى أن قمم منحنيات الرنين تقع عند ١٠٠ د/ث ، ٢٠٠ د/ث ،٤٥٠ د/ث وأن الترددات التى تصل إلى ٥ دورات ، ٢٥ دورة ،١٠٠ دورة على كلا الجانبين من هذه القمم سوف تُنتِج مخرجات outputs تبلغ كل منها على الأقل ٧ر٧٠ ٪ من اتساع المخرج عند التردد المُرِنّ .

إننا نستخدم غالبا حين نحلل الأصوات مرانين تدلنا على الترددات الموجودة.ونحن من الناحية العملية نستخدم مرانين كهربائية تعمل على نفس الأسس التى تعمل بها الشوك الرنانة التى عالجناها فيما سبق ؛فما من شوكة تُصدِر رنينا عند حدوث صوت ما مهما يكن هذا الرنين خافتا، إلا وكان علينا أن نعلم عندها أن واحدا من مكونات الموجة المركبة له نفس التردد الذى للشوكة الرنانة. والمرانين الكهربائية تمكننا من تأدية هذا النوع من التحليلات بدقة أكبر .

بيد أن تصميم المرانين التى تحقق هذا الغرض ،هو أمر من الصعوبة بمكان ؛ونحن كثيرا ما أكدنا أن المرانين التى يكون عرض الحزام الرنينى فيها من النوع الضيق (أى التى لها منحنيات رنين حادة) تستجيب لمجال ضيق من الترددات ،ولكنها تستغرق وقتا طويلا نسبيا حتى يمكن لاتساع اهتزازاتها أن يبلغ ذروته ،وهى أيضا ذات معدل بطىء من حيث سرعة الاضمحلال. ويمكن لهذا النوع من المرانين أن يدلنا بدقة على الترددات الموجودة فى أى موجة صوتية . ولكنها تستغرق كمية ملحوظة من الوقت لكى تقوم بذلك. وعكس ذلك صحيح ؛ذلك أن المرانين التى تستجيب لمجال واسع من الترددات تصل إلى النهاية العظمى بسرعة أكبر كثيرا وذلك لاتساعها. وربما لايمكن لهذا النوع من المرانين أن يدلنا بدقة على واحدة من مكونات الموجة المركبة ،ولكنها تحتاج إلى وقت أقل لكى توصل إلينا المعلومات .

ولهذا السبب لا لغيره توجد مشكلة تصميم المرنان الذى عليه أن يستجيب لتردد بعينه ولنفترض على سبيل المثال أننا أردنا أن نعرف ما إذا كان صوت كلامى بعينه يشتمل أو لايشتمل على مكون نغمى تردده ٥٠٠ د/ث ، فالمرنان الحساس لحزمة ضيقة من الترددات التى تقع حول ٥٠٠ د/ث سوف يستغرق وقتا ملحوظا لكى تتحقق استجابته، ولكن الصوت الكلامى الذى هو موضوع الدراسة ربما لايستمر هذه المدة، لذلك كان علينا أن نستخدم مرنانا يستجيب بسرعة أكبر ،وهذا يعنى - بطبيعة الحال - أنه يستجيب أيضا إلى مدى من الترددات أوسع ، ذلك أننا لانستطيع أن نعرف الترددات الدقيقة الموجودة فى صوت ما إلا إذا كان لدينا وقت كاف لكى يبدأ المرنان ذو الحزام الرئيسى الضيق فى الاهتزاز .

ومدة الزمن التى يستغرقها المرنان لكى يصل إلى نسبة متعارف عليها من الاتساع الكامل للاهتزازة تُعرَف " بثابت الزمن" لذلك المرنان time constant . وهناك بالفعل علاقة رياضية بسيطة بين عرض حزام المرنان وثابت الزمن لهذا المرنان . وتقوم إحدى الطرق المتبعة لتحديد ثابت الزمن على أساس معادلة فحواها أن حاصل ضرب عرض حزام المرنان (بالدورات) × ثابت الزمن (بالثوانى) = $\frac{١}{٢}$.
وعلى ذلك إذا كان عرض حزام المرنان يساوى ١٠ دورات ،فمن الممكن القول إن ثابت الزمن لهذا المرنان = $\frac{١}{٢٠}$ من الثانية حيث أن :
١٠ × $\frac{١}{٢٠}$ = $\frac{١}{٢}$ (٥) .

وهذا يعنى أننا إذا أردنا أن نَعرف بشيء من الدقة إذا كان صوت ما يحتوى على مكون ذى تردد معين وليكن ٥٠٠ د/ث ،واستخدمنا لذلك مرنانا يستجيب لحزام من الترددات عرضه ١٠ دورات من ٤٩٥ إلى ٥٠٥ د/ث ، حينئذ يجب أن نسمح للمرنان بمدة مقدارها $\frac{١}{٢٠}$ من الثانية

---

(٥) يعتبر هذا المثال معادلة رياضية ذات مجهول واحد هو ثابت الزمن ولنفترض أنه = س ،فبتطبيق العلاقة السابقة يصبح حل المعادلة كالاتى : ١٠ × س = $\frac{١}{٢}$ ∴ س = $\frac{١}{٢}$ ÷ ١٠ = $\frac{١}{٢٠}$ من الثانية (المترجم)

على الأقل حتى يستجيب • بيد أنه إذا كان الصوت الذى نفحصه هو صوت لغوى،فإنه يمكن أن يتعرض لتغيرات ملموسة خلال هذه المدة؛ ولذلك فربما يكون من الأفضل أن نستعمل مرنانا ذا حزام عرضه ٥٠ دورة • وسوف يستغرق هذا المرنان $\frac{١}{٥٠} \times \frac{١}{٢}$ (أى $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية) حتى يستطيع أن ينشئ اتساع اهتزاز يقبل المقارنة•ومن ثم إذا قنعنا بمرنان يستجيب لكل الترددات الواقعة بين ٥٢٥،٤٧٥ د / ث على سبيل المثال ،فنحن إذن فى حاجة إلى أن نسمح لهذا المرنان بفترة زمنية مقدارها $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية لكى يستجيب•وبهذا المرنان لانستطيع أن نعرف التردد الدقيق لمكونات صوت ما،ولكننا سنصبح قادرين على معرفة بعض المعلومات خلال الوقت القصير الذى يستغرقه الصوت •

ومعظم المرانين التى نهتم بها هى أجسام مهتزة ،مثل الشوكات الرنانة،وأوتار البيان • ولكن من الممكن أيضا لكتلة من الهواء أن تهتز ،وبذلك تعمل كمصدر للصوت أو كمرنان • وهذا هو ما يحدث حينما نجعل زجاجة ما تصدر صوتا وذلك بالنفخ فى فوهتها• والصوت الإنسانى والأرغن وكذلك آلات أخرى كثيرة تستفيد من اهتزاز عمود الهواء •

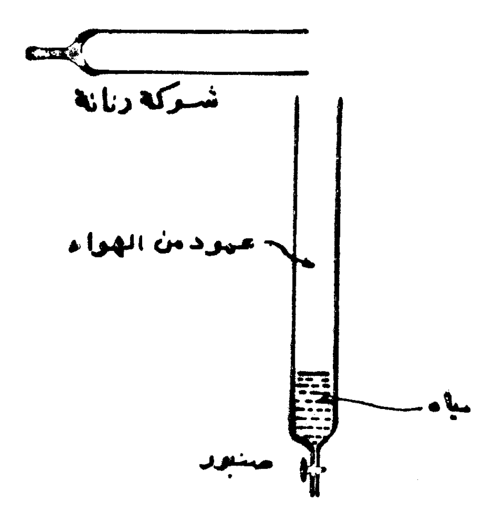
حينما كنا بصدد دراسة انتقال الصوت فى الفصل الأول ،رأينا أن الهواء يمكنه أن ينضغط وأن يتخلخل• وإذا كان الهواء يشغل حيزا مناسبا من المكان ،فإنه يمكنه بالفعل أن يسلك تماما مثل سلوك لولب ملفوف• فاللولب يمكننا أن نجعله يهتز بإعطائه طرقة خفيفة ، وسوف يتوقف معدل الاهتزازات أساسا على حجم اللولب وصلابته • وكذلك الهواء الموجود فى أنبوبة يمكن أن نجعله يهتز إذا أثير إثارة مناسبة• ويتوقف المعدل الذى تهتز به كتلة من الهواء على حجمه وعلى مرونته (وهو العامل المناظر للصلابة بالنسبة للولب الملفوف)• ويمكن اعتبار المرونة فى العادة عاملا فيزيقيا ثابتا،ولكن حجم كتلة الهواء يمكن - بطبيعة الحال - أن يتغير•

والأمر مع الهواء شبيه باللولب الملفوف حيث أن كتلة من الهواء - إذا كانت كبيرة - تهتز ببطء أكثر منها إذا كانت صغيرة ،هذا إذا اتفقا فى الطريقة التى يتحيزان بها فى المكان .

والشكل (٥ - ٧) يبين تجربة نمطية معملية لإنتاج عمود مهتز من الهواء. ويمكن التحكم فى الطول الفعال للأنبوبة وذلك بزيادة كمية المياه بها أو تقليلها. فحينما يكون الطول بحيث يصبح المعدل الطبيعى لاهتزاز عمود الهواء مساويا لمعدل اهتزاز شوكة رنانة موضوعة فوقه فحينئذ يحدث الرنين. وكما يحدث تماما فى أمثلة الرنين الأخرى،سوف تعمل الحركات الصغيرة التى تقوم بها الشوكة الرنانة كسلسلة من الضربات التى تنشأ عنها فى النهاية تحركات كبيرة تقوم بها كتلة الهواء. وهذه التحركات سوف تسبب إثارة فى الهواء المحيط وسوف تنتشر بطبيعة الحال متجهةً إلى الخارج على هيئة موجات صوتية .

والهواء الموجود فى حيز ما يهتز عادة بطريقة مركبة،فشكل حيز الهواء، وكذلك المادة المصنوع منها هذا الحيز ،هما من العوامل التى تؤثر على شكل الموجة المركبة. فالزجاجة إذا كانت - على سبيل المثال - ذات عنق ضيق وجسم كبير،تكون ذات تردد أساسى منخفض إذا قيست بزجاجة ذات عنق كبيروحجم أصغر نسبيا . وأعمدة الهواء الرنانة ذات أهمية كبيرة من وجهة نظرنا وذلك لأن الفرق بين كثير من أصوات الكلام إنما يرجع إلى ما يعرض لكتلة الهواء الموجودة فى الفم والقصبة الهوائية من تغيرات من حيث شكلها .

وإذا جعلنا سلسلة كاملة من الشوك الرنانة تطلق أصواتها فوق أنبوبة فارغة ،فإن بعضها لن يكون له تأثير على الإطلاق ،على حين تحمل شوكات أخرى الهواء على الاهتزاز داخل الأنبوبة. ولنفترض الآن أن هذه الأنبوبة وُضعت بجوار جدار غرفة ما ،حينئذ إذا أُطْلِقَت



شكل (٥ - ٧) تجربة معملية نمطية لإنتاج عمود من الهواء فى حالة اهتزاز .

بعض الشوك الرنانة أصواتها بجوار الأنبوبة فإن المستمع فى الغرفة الأخرى المجاورة لن يسمع صوتا لبعض هذه الشوك . ولكنه سيسمع صوتا خافتا لبعضها ، أما بعضها الأخير فسوف يسمعه عاليا جدا . فالعلو الذى سنستمع إليه يتوقف على المدى الذى يُحَمَّلُ به عمود الهواء على الاهتزاز بتأثير هذه الشوكة .

وحينما يسلك المرنان هذه السلوك فإنه يسمى مرشحا آكوستيكيا acoustic Filter . فالمرشح هو مرنان يُستخدَم لنقل

الصوت أو تمريره . وهو مرنان انتقائى بالنظر للتردد، إنه بعبـــــارة أخرى ينقل ترددا واحدا بكفاءة أعلى من غيره ، ومجال الترددات التى يقوم المرشح بتمريرها يطلق عليها " عرض حزام المرشح" band width of the filter " فاذا كان المُدخل للمرشح يتكون من عـدد كبير من الترددات المختلفة ، وكانت جميع الترددات ذات اتساع واحـد حينئذ يقال إن عرض حزامه هو مجال الترددات التى سوف يُسمح لهـــا بالمرور بنسبة ٧ر٧٠ ٪ على الأقل من اتساع التردد الذى يسمح المرشح له بالمرور بالكفاءة القصـوى .

الفصل السادس

السمع

يحتاج أى دارس للكلام التعرف على بعض الحقائق المرتبطة بالسمع . ويمكننا أن نبدأ بمعالجة نقطة أو نقطتين أخريين عن الدرجة المدركة perceived pitch للأصوات المختلفة . وقد سلمنا فى الفصول السابقة بأن الاحساس بدرجة الصوت يعتمد مباشرة على تردد الموجة ،غير أن هذا الافتراض فى حاجة إلى بعض التدقيق مادام تغير اتساع الموجة سوف يؤثر أيضا على الإدراك الحسى للدرجة pitch sensation . وتعتمد طبيعة هذا التأثير على تردد الصوت الذى نفحصه . ويمكن كقاعدة تقريبية أن نقول : أن زيادة اتساع أى صوت يكون تردده الأساسى فوق ١٥٠٠ د/ث لن يؤدى إلى زيادة علو الصوت فحسب ،بل إلى ارتفاع فى الدرجة أيضا ، وعكس ذلك صحيح ،فإذا زدنا من اتساع صوت مايكون تردده الأساسى تحت ١٥٠٠د/ث فإن الصوت سوف يسمع على أنه أكثر انخفاضا من حيث الدرجة وتستطيع أن تحاول هذا الإحساس بنفسك بأن تطرق شوكة رنانة ذات تردد ٢٠٠ د/ث على سبيل المثال ،ثم تحركها إلى الخلف ،وإلى الأمام بالقرب من أذنك . فحينما تكون قريبة من أذنك فإنها لن ترن بعلو أكثر فحسب ،ولكن درجتها ستكون أيضا أقل ارتفاعا منها لو كانت الشوكة أبعد من ذلك . وهناك طريقة أخرى لإجراء هذه التجربة ، وهو أن تغير من مفتاح التحكم فى حجم الصوت لجهاز الراديو أثناء الاستماع لإشارة ضبط الصوت ،فإذا كان تردد الإشارة الصوتية أقل من ١٥٠٠ د/ث ، فحينئذ عندما تدير مفتاح التحكم فى الحجم إلى أعلى ،سوف تبدو درجة الصوت أقل قدرا . وعلى أى حال ،وكما سيتضح لنا فيما بعد ،فإنك إذا حاولت إجراء هذه التجارب،فإن التغيرات فى الاتساع لن يكون لها تأثير كبير على درجة الصوت . لذلك ولمعظم الأغراض العملية فإننا مازلنا نستطيع القول بأن الدرجة التى نسمعها ، تعتمد على تردد الشكل الموجى .

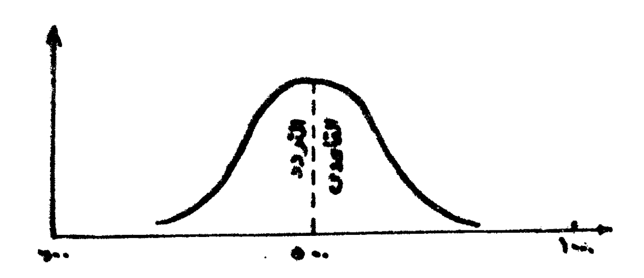
والآن نبقى مسألة الدرجة بالنسبة للأصوات المركبة حيث تكون الطاقة مرتبطة بأكثر من تردد واحد. ففى الأصوات المركبة ذات الأشكال الموجية اللاتكرارية ، تتوقف الدرجة التى ندركها على متوسط من نوع ما للترددات المكونة كما أن فى الموجة المضمحلة ذات الطيف المتماثل،على النحو المبين فى الشكل (٦ - ١) تعتمد الدرجة أساسا على تردد المكون الموجى الذى يحظى بأكبر اتساع وتدعى غالبا التردد القاعدى لهذه الموجة basic frequency .

أما الدرجة التى تشعر بها لصوت مركب ذى شكل موجى تكرارى فإنها لاتعتمد على تردد المكون الموجى الذى يحظى بأكبر اتساع، ولكنها تعتمد على التردد الأساسى للتكرار الذى يشكل الموجة المركبة. ومثال ذلك الشكل الموجى المبين فى الشكل (٦ - ٢) ،فالتردد الأساسى لهذا الشكل ١٠٠ د/ث . لذلك فان درجة هذا الشكل الموجى سوف تصبح مماثلة لدرجة نغمة نقية ذات تردد مقداره ١٠٠ د/ث مع تباين فى الاتساع . وصحيح أن اتساع التوافقيتين الثانية والثالثة معا أكبر من اتساع التردد الأساسى ، غير أن ذلك لايترتب عليه أى نتائج مادمنا نحصر اهتمامنا فى الدرجة المدركة للصوت .

ومن المهم أن نلحظ أننا إذا أجرينا تحليلات التردد لموجة مركبة ،فقد نكتشف أنه لاوجود لمكون موجى يساوى تردده تردد تكرار الموجة المركبة ذاتها. إننا إذا افترضنا استمرار الشكل الموجى المبين بالشكل (٦ - ٣) إلى مالانهاية ،فإنه من الممكن أن نحلله إلى مكونات موجية تردداتها ١٨٠٠، ٢٠٠٠، ٢٢٠٠ د/ث . ولكن النموذج الموجى المركب يكرر نفسه ٢٠٠ مرة فى الثانية (اى أن المسافة من (أ) إلى (ب) هى $\frac{١}{٢٠٠}$ من الثانية) ،يترتب على ذلك أن الدرجة التى نشعر بها لهذا الصوت سوف تكون مماثلة لدرجة نغمة نقية ذات تردد ٢٠٠ د/ث بالرغم من أنه يمكن القول بأن الموجة المركبة لن تشتمل إلا على مكون موجى متخيل تردده الأساسى هو ٢٠٠ د/ث .وهناك طريقة أخرى لتحليل تردد هذه الموجة المركبة وهو أن

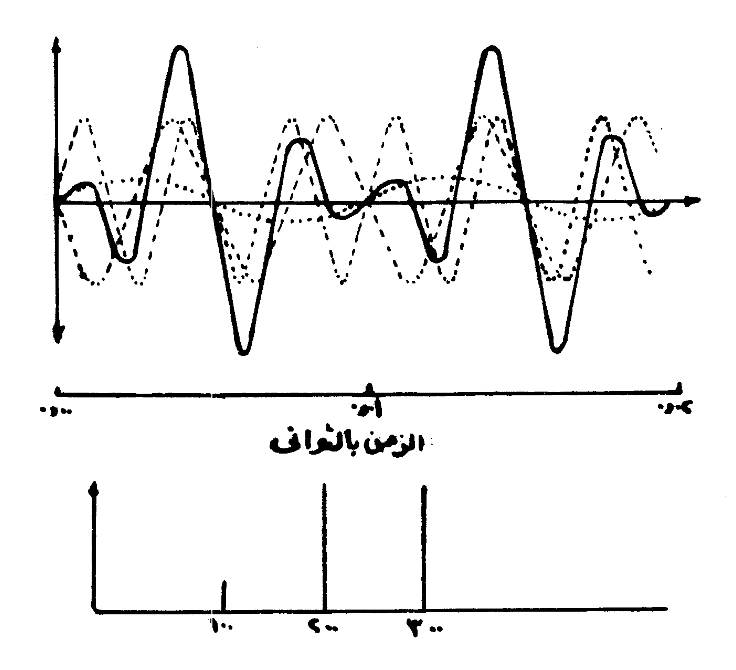
نقول بوجود مكونات موجية ذات ترددات مقدارها ٢٠٠ ،٤٠٠،٦٠٠،٨٠٠... وكل الأعداد الصحيحة الأخرى لمضاعفات العدد ٢٠٠،ولكن ثلاثا فقط من هذه المكونات ،وهى تلك التى تبلغ تردداتها ١٨٠٠،٢٠٠٠،٢٢٠٠ د/ث هى التى تشتمل على اتساع ذى تأثير .

ولأن الاذن تكشف عن الدرجة بهذه الطريقة،فإنه يمكننا غالبا أن نستبعد المكونات ذات التردد الأقل فى موجة مركبة بدون أن يؤثر ذلك على الدرجة المدركة . فنحن نستطيع - على سبيل المثال - أن نمرر موجة مركبة ذات تردد أساسى مقداره ١٠٠ د/ث من خلال مرشح كهرباشى يستبعد كل الترددات التى هى أقل من ٥٠٠ د/ث . ومادامت بعض المكونات ذات الترددات الأعلى مازالت تتوالى بفاصل مقداره ١٠٠ د/ث فإن الموجة المركبة سوف تظل تتكرر ١٠٠ مرة فى الثانية، والدرجة التى نسمعها سوف تستمر بدون تغيير .



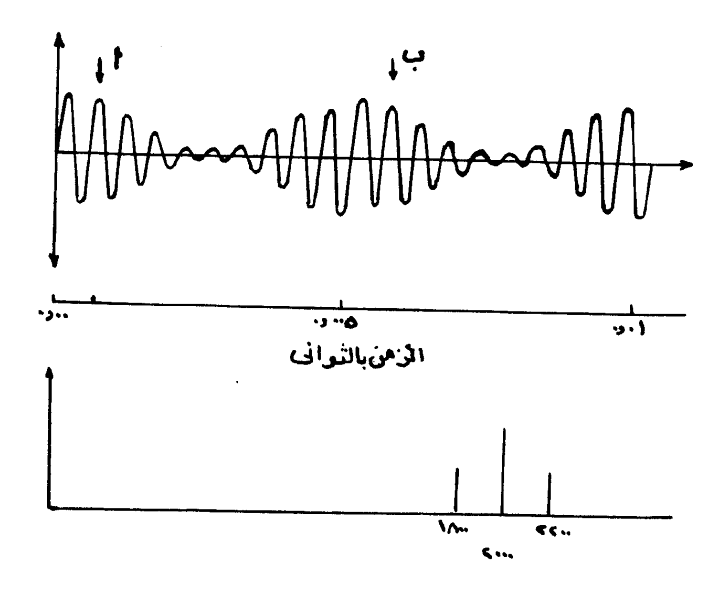
شكل (٦ - ١) طيف موجة مضمحلة

والحق أن دائرة التليفون العادى لاتمرر طاقة كبيرة تحت ٣٠٠ د/ث . وبالرغم من أن ذلك سوف يؤثر على نوعية الصوت (حيث أن النوعية تتوقف على الطريقة التى تتوزع بها الطاقة بين مكونات التردد) .ومع ذلك فإن الدرجة المدركة سوف تبقى دون تغيير .



شكل (٦ ـ ٢) الشكل الموجى والطيف لموجة مركبة ذات درجة مماثلة لتلك التى لنغمة نقية ترددها ١٠٠ د/ث .

هذا الفرق بين الطرق التى تكتشف بها الأذن الجوانب المختلفة للصوت ،تؤثر على نوع التحليل الذى نجريه . فحينما نريد أن نجرى مقارنة بين نوعيتى صوتين مختلفين ،فإن التحليل بدلالة مكونات التردد سوف تمكننا من صياغة أبسط العبارات وسوف تصبح رسومات الطيف التوضيحية أحسن طريقة للحصول على المعلومات بوسائل واضحة . ولكننا حينما نريد أن نتناول الفروق التى نسمعها فى الدرجة ،فلا بد أن نهتم بالترددات الأساسية ،وفى هذه الحالات تكون الرسومات التوضيحية للموجات المركبة فى العادة كافية بذاتها .



شكل (٦ - ٣) الشكل الموجى والطيف لموجة مركبة ذات درجة مماثلة لدرجة نغمة نقية ترددها ٢٠٠ د/ث .

ولسنا فى هذا الكتاب معنيين ببحث فسيولوجيا السمع ،إن وظيفة الأذن هى تحويل الموجات الصوتية والتى هى صورة من صور الطاقة ، إلى نبضات عصبية ،وهى صورة كهروكيمائية electro-chmical , للطاقة التى يمكن التعامل معها،من خلال المخ. والطريقة التى تجرى بها هذه العملية واقعة خارج نطاق اهتمامنا. ولكن من المثير للاهتمام أن نلحظ أن كثيرا من النظريات الحديثة الخاصة بالسمع تفترض أن الأذن تنتج نماذج من النبضات تناظر بعض تحليلات التردد للموجة المركبة ،وسلسلة من النبضات الإضافية تناظر جزئيا معدل تكرار الموجة المركبة. وفى جميع الاحتمالات فإن ما

نسمعه بصفته نوع للصوت يتوقف الى حد بعيد على المجموعة الأولى من النبضات بينما تتوقف الدرجة المدركة (عند أى معدل للنغمات المنخفضة) على المجموعة الثانية .

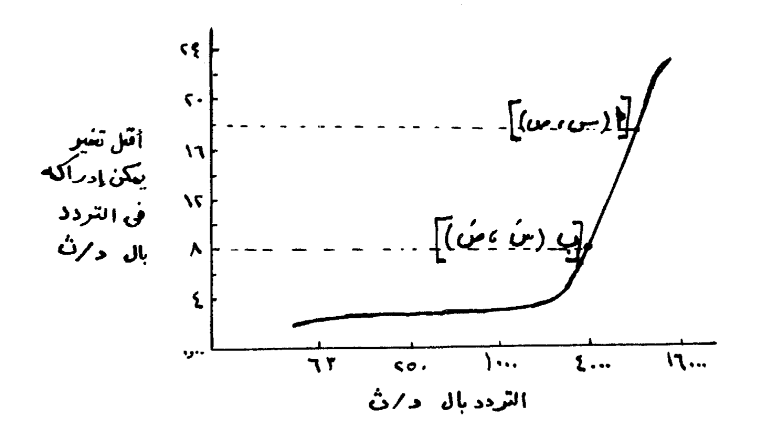
والأذن قادرة على التمييز بين عدد كبير من الدرجات المختلفة. وأقل تغير فى التردد يمكننا اكتشافه كتغيير فى الدرجة هو حوالى ٢ أو ٣ د/ث فى النغمات التى ترددها أقل من ١٠٠٠ د/ث. أما للنغمات الأكثر ارتفاعا فإن تغيرا كبيرا متزايدا يجب أن يحدث قبل أن نفطن لحدوث تغيير فى الدرجة . ولدينا منظومة من القيم لقياس حساسية الأذن لتغيرات التردد موضحة فى شكل(٦ - ٤). ويمكنك أن ترى أن تغير التردد فى النغمات المرتفعة وهى التى تكاد تُسمَعُ على أنها تغير فى الدرجة تُمَثِّلُ نسبة ثابتة إلى حد ما تبلغ حوالى $\frac{١}{٥٠٠}$ أو ٠٠٢ر من تردد الصوت (١) . وعلى ذلك فان أقل فرق يمكن ملاحظته عند التردد ٤٠٠٠ د/ث هو حوالى ٠٠٢ر x ٤٠٠٠ أى ٨ د/ث . ، والتردد ٧٠٠٠ د/ث هو حوالى ٠٠٢ر x ٧٠٠٠ أى ١٤ د/ث . ومادامت الأذن أكثر حساسية لتغيرات التردد فى الجزء الأسفل من المقياس ، فإن الفروق فى الدرجة بين النغمات التى تبلغ تردداتها ٦٠٠، ٧٠٠ د/ث ، سوف تكون أكبر بكثير من الفرق بين النغمات ذات التردد ٣٦٠٠ ، ٣٧٠٠ د/ث .

---

(١) الكسر $\frac{١}{٥٠٠}$ أو ٠٠٢ر. يمثل ميل المستقيم فى المسافة من النقطة (أ) إلى النقطة (ب) وهو يساوى باستخدام قواعد الهندسة التحليلية :

$$\frac{\text{ص} - \text{صَ}}{\text{س} - \text{سَ}} = \frac{١٨ - ٨}{٩٠٠٠ - ٤٠٠٠} = \frac{١٠}{٥٠٠٠} = \frac{١}{٥٠٠} = ٠٠٢ر.$$

علما بأن قيم ص ،صَ ،س ،سَ مأخوذة من الرسم البيانى شكل (٦ - ٤) بمعرفة المترجم وهى قيم تقريبية ، إذ أن ليد فوجد جعل التدرج على المحور الأفقى تدريجيا غير خطى لضيق المسافة not Linear scale (المترجم).



شكل (٦ - ٤) رسم بيانى يوضح القدر الذى يجب أن يتغير به تردد نغمة ما لكى يحدث تغيرا فى الدرجة .

فبين الأوليين من النغمات [٦٠٠ ، ٧٠٠] يوجد حوالى ٣٥ فرقا فى التردد قابلا للادراك (٢) ، ولكن بين الزوجين الأكثر ارتفاعا

---

(٢) وذلك أن أقل تردد يمكن الإحساس به بين هاتين النغمتين (٦٠٠، ٧٠٠) هو من الرسم البيانى (٦-٤) حوالى ٩ر٢ د/ث لأن - متوسط تردد النغمتين $\frac{٦٠٠ + ٧٠٠}{٢}$ = ٦٥٠ د/ث على المحور الأفقى ، يقابل ٩ر٢ د/ث على المحور الرأسى .

فالأذن إذن فى هذه المنطقة (من ٦٠٠ - ٧٠٠) تستطيع أن تميز أى فرق فى التردد بحيث يبلغ فى المتوسط ٩ر٢ د/ث .

فإذا كان اجمالى الفرق هو ٧٠٠ - ٦٠٠ = ١٠٠ د/ث .

فإن عدد الفروق الممكن للأذن ملاحظتها = $\frac{١٠٠}{٢،٩}$ = ٣٤،٤٨ ≅ ٣٥ فرقا .

فتكون سلسلة الترددات الممكن ملاحظة ما بينها من فرق فى الدرجة هى المتوالية الحسابية الآتية : ٦٠٠، ٦٠٢،٩، ٦٠٥،٨، ٠٠٠ ← ٧٠٠ د/ث . =

[٣٦٠٠ - ٣٧٠٠] يوجد هناك ١٤ فرقا فقط (٣) ،ويجب أن يكون بين النغمتين فى هذه المنطقة فاصل قدره ٢٥٠ د/ث تقريبا لكى يوجد فارق فى الدرجة يمكن مقارنته بالفرق بين الزوجين : ٦٠٠ ،٧٠٠ د/ث (٤) .

ونحن غالبا نريد أن نمثل الفرق فى الدرجة المدركة بين النغمات بواسطة نقط على شكل بيانى أو رسم يوضح الفروق فى الترددات، وقد يكون من المناسب - تحقيقا لكثير من الاهداف - أن نتمكن من تمثيل الفترات المتساوية فى الدرجة باستخدام نقاط متساوية البعد على الرسم . ولكى نفعل ذلك لابد من معرفة العلاقة بين تردد نغمة ما وارتفاعها على مقياس الدرجة. وقد تم الحصول على هذه العلاقة بواسطة تجارب سيكلوجية متعددة وأثبتت جميعها أن الأذن تسلك فى ذلك طرقا بالغة التعقيد، ولكن كقاعدة تجريبية تقريبية نستطيع القول بأن الدرجة المدركة لنغمة ما ،تزداد بانتظام مع التردد الخاص بها وذلك بين ١٠٠ د/ث ، ١٠٠٠ د/ث ... ولذلك يكون الفرق فى الدرجة - على سبيل المثال - بين نغمتين

= فإذا أحصينا حدود هذه المتوالية وجدناها ٣٦ حدا تحتوى على ٣٥ فرقا . (المترجم).

(٣) وبالمثل يكون فرق الترددات الحساس للأذن فى منطقة الترددات التى بين ٣٦٠٠ د/ث ،٣٧٠٠ د/ث هى من الرسم البيانى حوالى ٧ د/ث فإذا كان إجمالى الفروق هو ٣٧٠٠ - ٣٦٠٠ = ١٠٠ د/ث - فإن عدد الفروق الممكن للأذن ملاحظتها هى : $\frac{١٠٠}{٧}$ = ١٤٫٢٨ = ≃ ١٤ فرقا.

فتكون سلسلة الترددات الممكن ملاحظة ما بينها من فرق فى الدرجة هى المتوالية الحسابية ٣٦٠٠ ،٣٦٠٧ ،٣٦١٤، ... ،٣٧٠٠ د / ث .

فإذا أحصينا حدود هذه المتوالية وجدناها ١٥ حدا تحتوى على ١٤ فرقا . (المترجم).

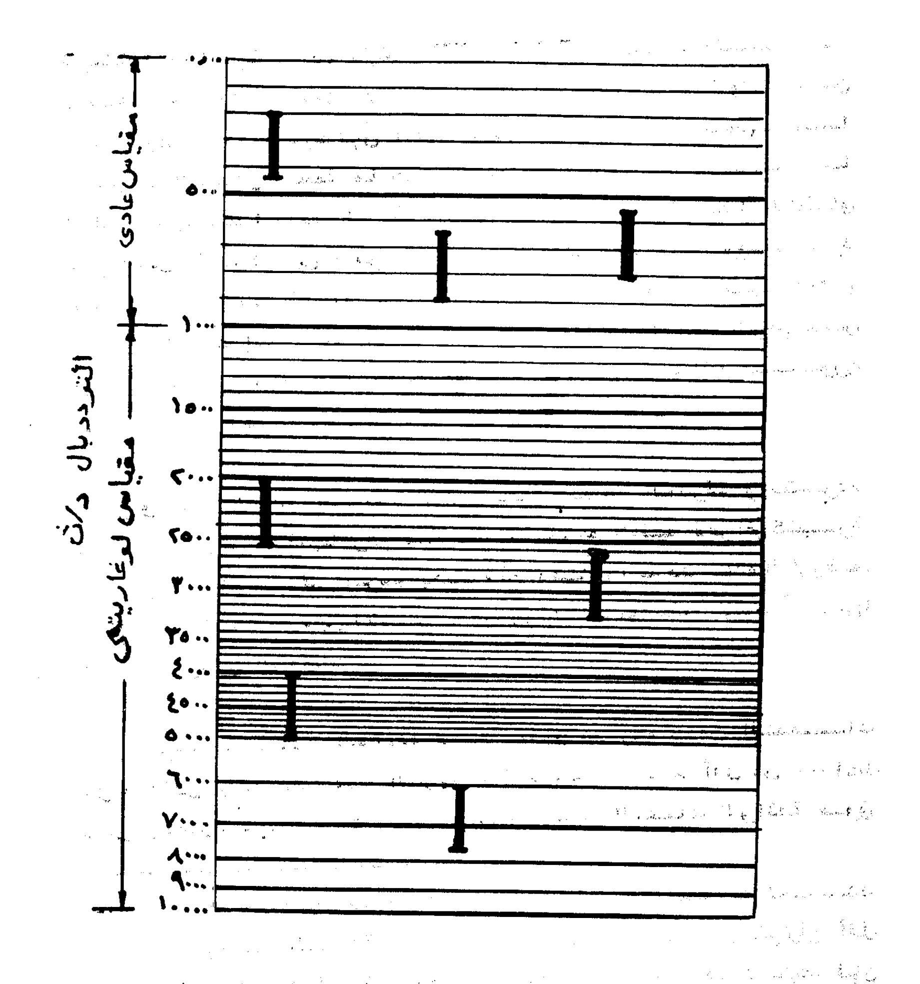
(٤) يقصد أننا لو أردنا الحصول على عدد من الفروق فى الدرجة =

ترددهما ٣٠٠ د/ث ، ٤٥٠ د/ث مماثلا تماما للفرق بين نغمتين ترددهما ٤٥٠ د/ث ، ٦٠٠ د/ث وكذلك ٧٥٠ د/ث ،٩٠٠ د/ث . ولكن بين ١٠٠٠ د/ث ، ١٠٠٠٠ د/ث فإن العلاقة بين الدرجة التى نسمعها والتردد الحقيقى لنغمة ما هو ما يصفه الرياضيون بأنها لوغاريتمية ،وهذا يعنى أن مدى الدرجة بين نغمتين فى هذا النطاق يتوقفعلى النسبة بين الترددين ،ومثال ذلك أننا نلاحظ وجود مقدارين متساويين للدرجة من ١٥٠٠ د/ث إلى ٣٠٠٠ د/ث (نسبة ١:٢) ومن ٤٠٠٠ د/ث إلى ٨٠٠٠ د/ث (النسبة ١ :٢ أيضا) على الرغم من أن الفاصل بين نغمتى الزوجين الأولين هو ١٥٠٠ د/ث إذا قورن بالفاصل بين نغمتى الزوجين الآخرين وهو ٤٠٠٠ د/ث).

وصحيح أن هذه القاعدة للعلاقة بين الدرجة المدركة والتردد هو مجرد تقريب ،لكنها رغم ذلك دقيقة بدرجة كافية لأغراض كثيرة ولذلك فقد جُهِّزتْ ورقة الرسم بحيث قُسِّمَ مقياس التردد بهذه الطريقة، والشكل (٦ - ٥) يبين لنا جزءاً من ورقة الرسم هذه حيث دُوِّنَ عليها عدد من أزواج النغمات .

فإذا كانت هذه القاعدة صحيحة ،فإن كل زوجين من النغمات سوف يمثلان بدقة نفس مدى الدرجة ، فحيث تكون النغة أقل من ١٠٠٠د/ث فسوف يفصلها تردد ثابت (٢٥٠ د/ث) ،ولكن النغمات الواقعة فوق

= الممكن ملاحظتها فى منطقة (٣٦٠٠ ← ٣٧٠٠) مساوية لعدد الفروق فى المنطقة (٦٠٠ ← ٧٠٠) أى ٣٥ فرقا ،وبفرضأن أقل فرق يمكن ملاحظته فى منطقة (٣٦٠٠ ← ٣٧٠٠) هو ٧ د/ث، فإن الفرق بين ترددى الموجتين اللتين تحققان ذلك يجب أن يكون ٧ × ٣٥ = ٢٤٥ ≈ ٢٥٠ د/ث . فى حين أن الفرق الموجود هو ٣٧٠٠- ٣٦٠٠ = ١٠٠ د/ث فقط (المترجم).



شكل (٦ ـ ٥) مقياس كوونج حيث تمثل الخطوط أزواجا من النغمات تفصلها مَدَيَات متساوية من الدرجات .

١٠٠٠ د/ث ،فإن الثابت هو النسبة (١ :٣ر١) . وعلى أى حال فإن جميع الخطوط التى تفصل هذه النغمات متساوية فى الطول، وميزة

هذا النوع من الرسوم البيانية أنه عند تحديد أى نقطة عليه فإن المسافة العمودية المعينة تمثل دائما نفس التغير فى الدرجة المدركة . ويُستخدَم هذا النوع من المقاييس غالبا فى علم الأصوات ويسمى بمقياس كوونج Koeng .

وهناك أيضا طريقة أكثر دقة لتمثيل الفروق فى الدرجة وذلك بواسطة مقياس مل mel . ويعرف " المل" بصفته وحدة لقياس الدرجة . فإذا كان الفرق بين أزواج من النغمات مساويا لعدد ثابت من المِلّات ، فإن الفاصل بينها أيضا سيكون فترات متساوية من الدرجات .

وهذه الوحدة القياسية مشتقة من تجارب سيكوفيزيقية كثيرة حيث يُطلب من المختبرين أن يقوموا بأدوار معينة ،كأن يقرروا متى تكون درجة نغمة ما،مساوية نصف درجة نغمة أخرى ،ومتى تكون نغمة ما فى منتصف المسافة بين آخريين من حيث الدرجة . ولقدمكنت هذه التجارب من رسم العلاقة بين التردد لنغمة ما وقيمتها على مقياس مِلْ mel . والجدول التالى يعطى فكرة عن قيم " مل" لعدد قليل من الترددات :

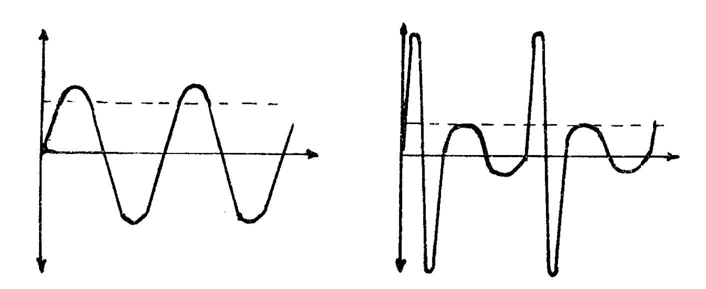
الدرجة بالمل	التردد (د/ث)	الدرجة بالمل	التردد (د/ث)
صفر	٢٠	١٢٥٠	١٤٢٠
٢٥٠	١٦٠	١٥٠٠	١٩٠٠
٥٠٠	٣٩٤	١٧٥٠	٢٤٥٠
٧٥٠	٦٧٠	٢٠٠٠	٣١٢٠
١٠٠٠	١٠٠٠	٢٢٥٠	٤٠٠٠

وتحول بيانات التردد الخاصة بأصوات الكلام غالبا الى وحدات المل قبل رسمها.

ويمكننا الآن أن نعود إلى اختبار العلو فى الأصوات المختلفة . لقد رأينا سابقا أن علو صوت ما ، يعتمد أساسا على اتساع الموجة . ولقد استخدمنا مصطلح" اتساع" فيما سبق بطريقة عامة لكى يعنى أى تغير يحدث فوق الضغط العادى أو تحته . ولكن لنفترض أننا أردنا أن نقارن بين اتساعى الصوتين اللذين يظهر النموذج الموجى الخاص بكل منهما فى الشكل رقم (٦ - ٦) . إن علينا ، لكى نجرى مقارنة صادقة ، ألا نأخذ النهايات العظمى للاتساع ، وإنما شيئا شبيها بالمتوسط لكل التغيرات بالنسبة الضغط العادى فى كل من هذين الشكلين الموجيين، ذلك لأننا إذا أجرينا المتوسط الحسابى مباشرة ، فإن النتيجة فى كلا الحالين ستساوى صفرا ، مادام كل زيادة ترتبط تماما بنقص فى الضغط . لذلك فإنه من النافع لنا أن نستفيد من الوسيلة الرياضية التى تعطينا نوعا آخر من المتوسط تعرف قيمته ب ج.م.م - (r. m. s) والتى تتفق إلى حد كبير مع أفكارنا البدهية عن متوسط الاتساعات لهذين الشكلين الموجيين. فإذا لم تكن متعمقا فى الرياضة ، يمكنك ببساطة أن تعتبر جذر متوسط مربعات الاتساع صيغةً مفيدة لمتوسط تغيرات الضغط لصوت ما ، ولا تشغل بالك بالنسبة للتفاصيل . والحق أن الرمز ج.م.م يقابل جذر متوسط المربعات والطريقة التى نصل بها إلى هذه الكمية هى أن نربع قيم كل النقط التى يمر الخط بها (وهذا يحولها جميعا إلى قيم موجبة ، طالما أنه على سبيل المثال : - ٢ × - ٢ = + ٤) . وبعد ذلك نحصل على متوسط لهذه القيم ، ثم نحصل أخيرا على الجذر التربيعى لهذه الكمية (٥) . فهذه الكمية هى مقياس لمتوسط التغيرات فى ضغط الهواء ، وتظهر قيم جذر متوسط المربعات لاتساعات الموجات الموضحة بالشكل (٦ - ٦) على هيئة خط متقطع .

---

(٥) الشكل المقابل يوضح الفكرة الرياضية لاستخراج الجذر التربيعى لمتوسط المربعات للاتساع (أو لغيرها) . فإذا افترضنا



شكل (٦ - ٦) موجتان مركبتان، وحينما نقارن علو هذين الصوتين يجب أن نعتبره جذر متوسط المربعات للاتساعات (الموضح بالخط المتقطع) وليس قمم الاتساعات .

وبالنسبة لهاتين الموجتين ، نجد أن الموجة التى تَكُون ذروة سعتها فى أصغر حالاتها (أى يكون ضغط الهواء فى أقصى حالات صغرة) ،سيكون لها أكبر اتساع بالنسبة لجذر متوسط المربعات (ج٠م٠م)، وما دام علو أى صوت متوقفا (ج٠م٠م) الاتساع وليس على قمة

= أن الكميات التى لدينا هى :

$ص_1$ ،$ص_2$، $ص_3$ ، $ص_4$ ، $ص_5$ ، $ص_6$

فإن ج٠م٠م (أى جذر متوسط المربعات)

$$= \sqrt{\frac{ص_1^2 + ص_2^2 + ص_3^2 + ص_4^2 + ص_5^2 + ص_6^2}{٦}}$$

ولايهم فى هذه الحالة أن تكون الكميتان $ص_5$ ،$ص_6$ سالبتين لأنهما سيتحولان إلى مقدارين موجبين بعد تربيعهما : $ص_5^2$ ، $ص_6^2$ (المترجم)

الاتساع،فإن الصوت الأول يكون أعلى من الثانى .
وما دام اهتمامنا البسيط منصرفا إلى تحديد أى الصوتين أعلى من الآخر فنحن فى حاجة أن نعرف أى اتساع لأحد الصوتين أكبر من اتساع الصوت الآخر . ولكننا لو أردنا أن نعرف بأى قدر يكون الصوت أعلى،فيجب علينا أن نقارن قدرة power كل من الصوتين (٦). إن قدرة صوت ما تتوقف على مربع الاتساع. وبذلك إذا تضاعف اتساع صوت ما،فإن القدرة سوف تزداد بعامل مقداره ٢^{٢} أى ٤ ، فإذا زاد الاتساع السابق إلى ثلاثة أمثاله فإن القدرة سوف تزداد تسع مرات فتصبح ٣٦ مثلا من قيمتها الأصلية (٧) وسنرى أن فروق القدرة بين الأصوات تكون ضخمة غالبا.

---

(٦) القدرة أحد مصطلحات علم الميكانيكا،وهو مقدار يبين معدل بذل الشغل بالنسبة للزمن. فما دام الصوت ينتج من حركة جزيئات الهواء وانتقالها مسافة معينة تتناسب مع قوة الصوت المؤثرة على هذه الجزيئات ،يقال إن الصوت بذل" شغلا" معينا. فلو رمزنا للقوة المؤثرة بالرمز (ق) وللمسافة التى تحركتها جزيئات الهواء بالرمز (ف) وللشغل المبذول بالرمز(ش) فإن الشغل = القوة × المسافة.
أى أن ش = ق × ف
أما القدرة (قُد) فهى معدل بذل هذا الشغل بالنسبة للزمن (ن)
أى أن :

$$\text{قُد} = \frac{\text{الشغل المبذول}}{\text{زمن هذا الشغل}} = \frac{\text{القوة} \times \text{المسافة}}{\text{زمن الشغل}} = \frac{\text{ق} \times \text{ف}}{\text{ن}}$$

فإذا قدرت القوة بالداين ،والمسافة بالسنتيميتر،والزمن بالثانية ،كانت وحدات القدرة هى :
داين . سم /ث . " المترجم" .

(٧) إذا رمزنا للاتساع بالرمز(ع) والقدرة بالرمز(قُد)، والتناسب بالرمز ($\propto$) فإن (قُد) $\propto$ ع^{٢}، فاذا تضاعفت (ع) وأصبحت = (٢ع) فان قد $\propto$ (٢ع)^{٢} اى أن قد $\propto$ ٤ ع^{٢} .

والقيمة الحقيقية لقدرة صوت ما يمكن أن تحدد بدقة بواسطة الوحدات التى يستخدمها الفيزيقيون .

وبالمثل فإن الاتساع يمكن أن يعبر عنه بدلالة الوحدات التى يستخدمها الفيزيقيون فى قياساتهم لضغط الهواء(٨) . وعلى أى حال فنحن لانريد أن نشغل أنفسنا بالبحث فى طبيعة هذه الوحدات مادمنا لانهتم عادة بالقيم المطلقة للقدرة أو لاتساع الصوت ،ولكن الذى يهمنا فقط هو قيمتها بالنسبة للأصوات الأخرى، وخبرتنا التى تعتمد عليها فى هذا المجال، هو أن نحدد صوتا - كمستوى مرجعى للمقارنة reference level - له اتساع قدره ٠٠٠٢ر داين /سم٢، وقدرة مقدارها ١٠^-١٦ وات /سم٢. وبناء على ذلك نستطيع أن نعالج الاتساع أو القدرة لأى صوت على أن أيا منهما أكبر بكذا أو أقل بكذا من هذه القدرة أو تلك التى للصوت المرجعى.

والصوت المرجعى الذى حددناه لايكاد يصل فى علوه إلى علو أخفت صوت يمكن سماعه بالكاد فى حالات التجريب المناسبة . أما أعلى صوت يمكننا تحمله بدون شعور بالألم فى آذاننا فله قدرة تزيد أكثر من ٠٠٠ر٠٠٠ر٠٠٠ر٠٠٠ر١ مرة من ذلك (وهذا يعنى بطبيعة الحال أن اتساعه أكبر من ذلك الذى للصوت المرجعى بما يزيد على ٠٠٠ر٠٠٠ر١ مرة) .

والشكل (٦ - ٧) يبين قدرات الأصوات مكونا ١٣ درجة من درجات سلم للعلو كل درجة تساوى الأخرى تقريبا . تبدأ من المستوى

---

* فاذا زاد الاتساع السابق (٢ع) إلى ثلاثة أمثاله فأصبح (٦ع) .
فان قد ∝ (٦ع)٢
أى أن قد ∝ ٣٦ ع٢ . (المترجم) .

(٨) وهى الداين /سم٢ . (") .

المرجعى ثم تتصاعد إلى أعلى نغمة نستطيع احتمالها بدون شعور بالألم ،ويمكنك أن ترى أن الفرق فى القدرة (بالوات الفعلى للسنتيمتر المربع) أكبر كثيرا بين السلمتين ١٢، ١٣ منه بين السلمتين ١، ٢ ، أو بين ٢، ٣ ،ولكن القدرة النسبية بين أى سلمتين متعاقبتين تبقى دون تغيير.

و يرجع بعض السبب فى ذلك إلى أن الفروق فى القدرة كبيرة جدا بين الأصوات ،وبعض السبب إلى أن الفروق فى العلو تتوقف على النسبة للقدرات أكثر من توقفها على القيم الحقيقية ،حتى أن الأكوستيكيين قد تبنوا مقياس الديسبل decibel . إن الفرق بالديسبل بين صوتين يحدد بعشر أمثال اللوغاريتم المعتاد للنسبة بين قدرتيهما. وهذا فى حقيقة الأمر ليس صعبا كما يبدو وسوف يثبت أنه سهل الفهم حتى لهؤلاء الذين قد نسوا المقصود باللوغاريتم العادى. والجدول التالى سوف يساعد فى جعل هذا الموضوع أكثر جلاء :

نسبة القدرة بين الأصوات	اللوغاريتم المعتاد لنسبة القدرة	الفرق بالديسيبل
١٠ الى ١	١	١٠
١٠٠ الى ١	٢	٢٠
١٠٠٠ الى ١	٣	٣٠

وكما نرى ،كل ما عليك أن تفعله للحصول على اللوغاريتم العادى لنسب القدرة power ratios فى الجدول ، هو أن تحسب عدد الأصفار، والفرق بالديسبل بين الصوتين يمكن الحصول عليه حينئذ بضرب هذا العدد x ١٠ ،فإذا طبقنا هذه الطريقة لنسب القدرة المبينة فى شكل (٦ -٧) فسوف نجد أن اللوغاريتم المعتاد لنسبة القدرة

بين أقوى صوت يمكن لأذن الإنسان أن تتحمله وبين المستوى المرجعى هو ١٣ حيث أن هذا العدد يحتوى على ١٣ صفرا (٩). والفرق بالديسبل (أو d b إذا استخدمنا الاختصار الشائع) بين هذين الصوتين هو إذن ١٠ أمثال العدد السابق ، أى ١٣٠ d b. وبالمثل فإن الفرق بالديسبل بين السلمة رقم ٣ والسلمة رقم ٥ - على سبيل المثال - هو ٢٠ db ، مادامت القدرة عند السلمة رقم ٥ أكبر ١٠٠ مرة منها عند السلمة رقم ٣ واللوغاريتم المعتاد للعدد ١٠٠ هو ٢ (١٠) . وهذا - بطبيعة الحال - مساو للفرق بين السلمتين ٨،٦ أو أى زوجين آخرين من السلالم له نسبة قدرة = ١٠٠ : ١ .

والآن ربما يمكنك أن ترى ميزات استخدام مقياس الديسبل فكل

---

(٩) النسبة بين القدرتين = ١٠،٠٠٠،٠٠٠،٠٠٠،٠٠٠ ÷ ١
= ١٠،٠٠٠،٠٠٠،٠٠٠،٠٠٠

∴ لوغاريتم النسبة بين القدرتين للأساس ١٠ أى اللوغاريتم المعتاد = لو ١٠ ١٠،٠٠٠،٠٠٠،٠٠٠،٠٠٠ = لو ١٠ $١٠^{١٣}$

= ١٣ لو ١٠ ١٠ = ١٣ × ١ = ١٣ (المترجم).

(١٠) لتحديد الفرق بالديسبل بين الصوتين نتبع الخطوات التالية :

أولا : النسبة بين القدرتين = $\frac{١٠٠ \ ٠٠٠}{١٠٠٠}$ = ١٠٠

ثانيا : اللوغاريتم المعتاد للنسبة بين القدرتين = لو ١٠ ١٠٠

= لو ١٠ $١٠^{٢}$ = ٢ لو ١٠ ١٠ = ٢ × ١ = ٢

ثالثا : ∴ الفرق بالديسبل بين الصوتين =
١٠ × اللوغاريتم المعتاد للنسبة بين القدرتين.
∴ الفرق بالديسبل بين الصوتين = ١٠ × ٢ = ٢٠ ديسبل.
(المترجم).

سلمة فى الشكل (٦ - ٧) تناظر تقريبا زيادة متساوية فى العلـو Loudness (١١) . فالفروق فى القدرة تتغير تغيرا كبيـرا . ولكن حين توضع هذه الفروق بالديسبل (١٢) . فإن كل سلمة تظهر مشابهة لغيرها . فاستخدام نظام الديسبـل يمكننا اختصار الأعداد الضخمة التى رأيناها إلى نسب يسهل التعامل معها ،بل إن الفـروق فى القدرة التى بين الأصوات أمكن أيضا وضعها بطريقة متشابهـة إلى حد كبير مع أفكارنا عن العلو ،وثمة خطأ يبلغ ١٠ ٪ على أكثر تقدير يكمن ضد معادلة انطباعاتنا عن الفروق فى العلو مع الفـروق الحقيقية بين الأصوات بالديسبـل .

ومن الطبيعى فإن القاعدة التى استخدمناها لإيجاد اللوغاريتم المعتاد لعدد ما ،تنطبق فقط على الأعداد التى على صورة ١٠ أو ١٠٠ أو ١٠٠٠ أو ٠٠٠ الخ. وحينما تكون نسبة القدرة بين صوتيـن ذات قمية واقعة بين هذه الأعداد مثل ٦٧ : ١ ،ينبغى علينا أن نستخدم

---

(١١) مادامت النسبة بين أى قدرتى صوتين متتاليين = ١٠

(وهى نسبة ثابتة) ،ولوغاريتم هذه النسبة = لو ١٠ = ١
١٠

فيكون الفرق بالديسبل بين أى صوتين متتاليين = ١٠ × ١

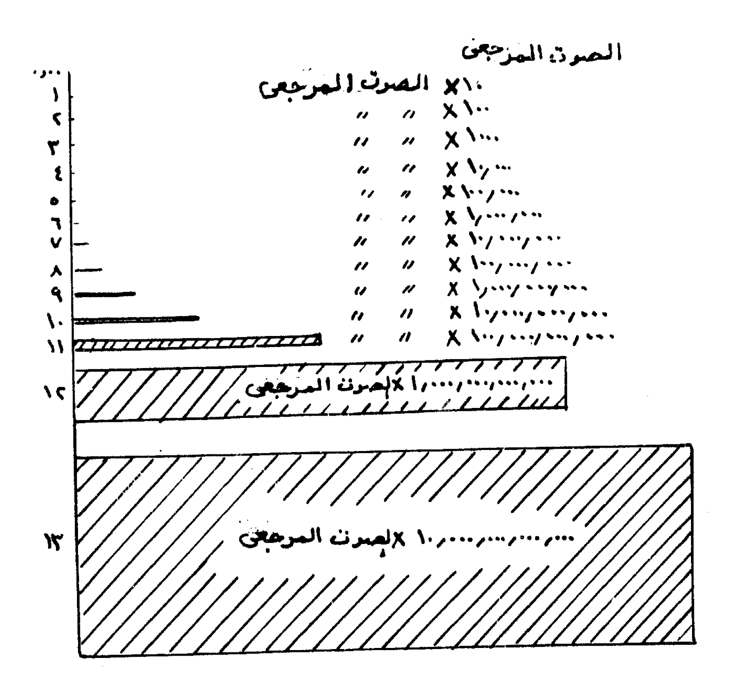
= ١٠ ديسبـل

والعدد الأخير ١٠ ديسبـل مقدار ثابت أيضا (المترجم) .

(١٢) وذلك طبعا بعد إيجاد النسبة بين قدرتى الصوتين أولا ثـم إيجاد لوغاريتم هذه النسبة ثم تحويل اللوغاريتم الـى الديسبل بضربه × ١٠ كما أوضحنا سابقا .

المترجـم) .

جداول اللوغاريتمات كخطوة لإيجاد الفروق بالديسبل بين الأصـــــوات.
والجدول التالى يعطيك فكرة عن عدد قليل من هذه القيم البينية.



شكل (٦ – ٧) قدرات الأصوات تُكَوِّنُ (١٣) سلمة متساوية تقريبا للعلو والقدرة لكل صوت بالوات لكل سنتيمتر مربع تتناسب مع مساحة كل سلمة.

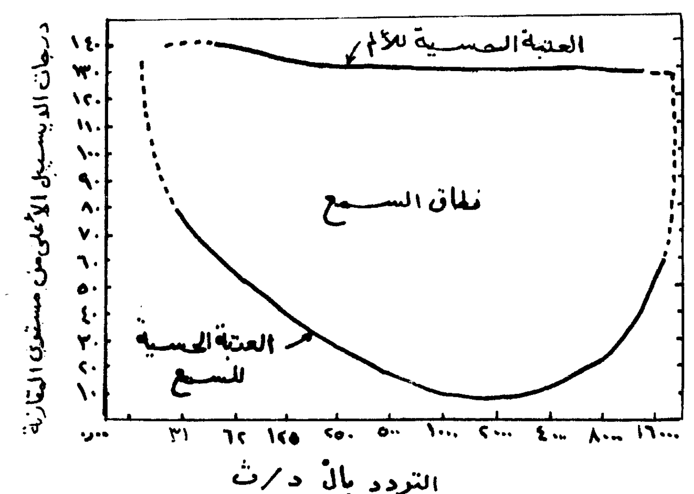
ولأننا تحدثنا فى الجزء الأول من هذا الكتاب عن الأصـــوات بدلالة اتساعها وليس بدلالة قدراتها، فلقد أوردنا أيضا عمـودا بين نسب الاتساعات amplitude ratios .

نسبة الاتساع بين الاصوات	نسبة القدرة بين الأصوات	لوغاريتم نسبة القدرة	الفرق بالديسبل
٧٠٧ر	٥ر٠ (أو ١ : ٢)	٣ر	٣
٥٠ر	٢٥ر(أو ١ : ٤)	٦ر	٦
٣٢ر	١٠ر٠(أو ١ : ١٠)	١ر٠٠	١٠

والقيم المعطاة فى الصف الأول من هذا الجدول ذات أهمية خاصة ،فهى توضح أنه حينما تكون القدرة لصوت ما تساوى نصف القدرة لصوت آخر،فإن اتساع الصوت الأول يكون ٧٠٧ ر مثلا من الصوت الثانى (حيث أن القدرة تعتمد على مربع الاتساع،وأن مربع ٧٠٧ ر= ٥ر٠ أى نصفا) ،وكما يمكنك أن ترى،فإن الصوتالواحد ،تحت هذه الظروف ، يفصله عما يليه ٣ ديسبل • وهذه القيم لها أهميتها لأننا كما رأينا من قبل (صفحة ٨٦) ، نعتبر عادة أن عرض الحزمة الكفء لمرنان هو المدى الذى يستجيب خلاله هذا المرنان لمستوى من المُدخلات بحيث تكون كل الترددات خلال هذا المدى لها اتساعيبلغ ٧ر٧٠ ٪ على الأقل من أكبر اتساع• والآن أصبحت العلاقة بين الاتساع والقدرة واضحة ، ونستطيع أن نرى كيف تم إيجاد القيمة ٧ر٧٠ ٪فكل الترددات خلال هذا المدى لها على الأقل نصف قدرة أقصى مُخرج output ، وطبقا لذلك فإن هذا المقياس للمدى الكفء لمرنان يُعَرَّف غالبا على أنه نصف القدرة لعرض الحزمة half power band - width .

وفى أول الفقرة التى تتحدث عن الاتساع والقدرة قلنا أن الصوت المرجعى هو فى علوه يقارب أخفت صوت يمكن للآذان أن تدركه تحت ظروف التجريب المناسبة • وفى الحقيقة فإن القدرة التى يجب أن تكون لدى صوت ما قبل أن نستطيع أن نسمعه تتوقف على التردد لهذا الصوت • فنحن نستطيع أن نستمع إلى النغمات فى منتصف مدى التردد حينما تكون ذات قدرة زائدة زيادة قليلة فقط عن الصوت

المرجعى ،ولكن النغمات المنخفضة جدا أو النغمات المرتفعة جدا يجبأن تكونأقوى من ذلك كثيراقبلأن تستطيع سماعها. والمنحنى التالى المبين فى الشكل (٦ - ٨) يوضح مدى القيم الممكنة بالنسبة لشاب صغير ذى سمع طبيعى.

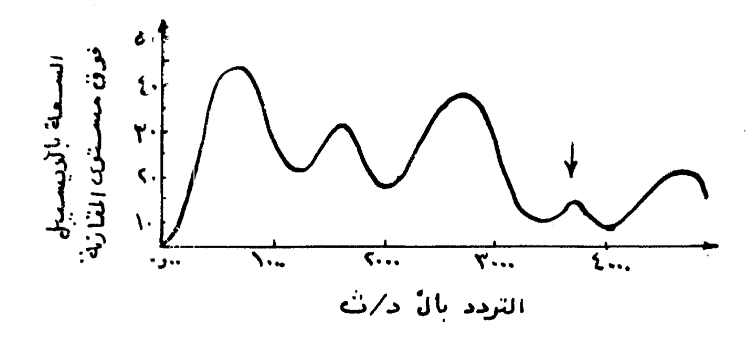


شكل (٦ - ٨) رسم بيانى توضح منطقة السمع فيه حدود التردد والاتساع لكل النغمات الممكن سماعها.

ويمكن أن نرى أنه حينما تكون النغمة ذات التردد ١٢٥ د/ث مسموعة بالكاد، تكون أكثر قدرة بمقدار ٣٠ ديسبل من النغمة التى نكادأن نسمعها وترددها ٢٠٠٠ د/ث.وبعبارة أخرى فإن الأذن تكون أكثر كفاءة حينما تكون فى منتصف مداها. وهى تتطلب قدرا وافيا من القدرة الزائدة لكى نجعلها تعمل بالنسبة لكلا نوعى النغمات المنخفضة جدا أو المرتفعة جدا. وبمجرد الوصول إلى حدود معينة للتردد لن يكون هناك إحساس بالصوت ،ولن يجدى مدى ضخامة قوة الإثارة فى الهواء مهما كانت ، وربما يكون هذا بسبب أن قسما من آليات الأذن لايمكنه أن يتهيأ لأن يهتز عند هذه الترددات القصية فى الارتفاع أو الانخفاض .

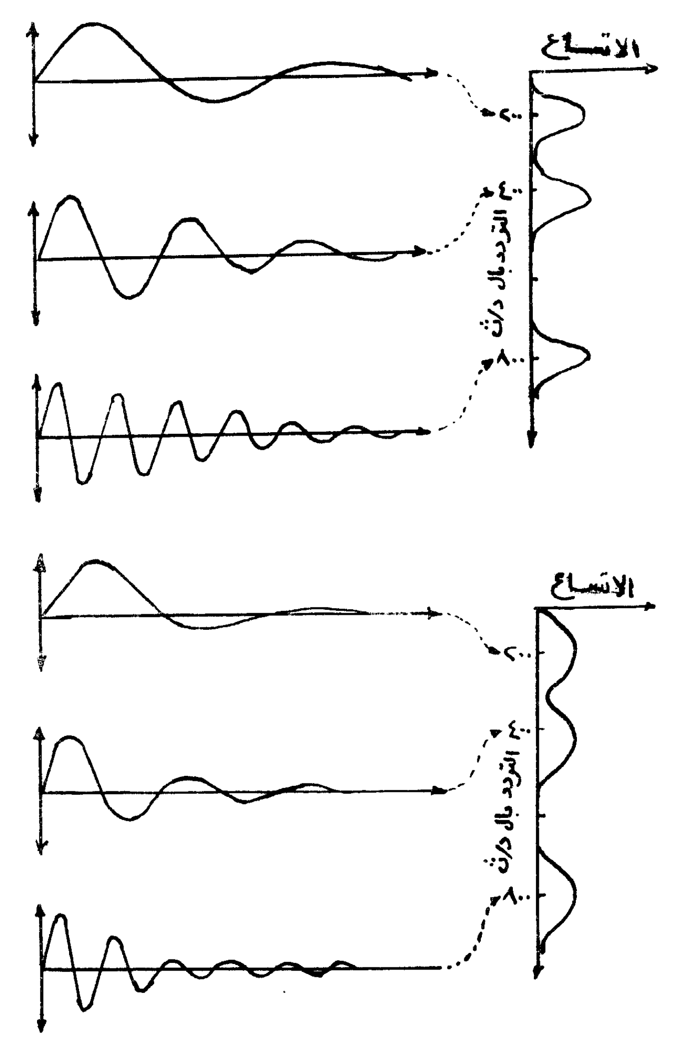
فالخط العلوى فى شكل (٦ — ٨) يمثل المستوى الذى تبدأ الأصوات عنده فى إحداث شعور بالألم فى الأذن ، فلو ارتفعت قدرة صوت ذى أى تردد — تقريبا — إلى أن اصبحت ١٣٠ ديسبل فوق المستوى المرجعى فسيوجد حينئذ شعور بعدم الراحة . وطبقا لذلك فإن الشكل (٦ — ٨) يوضح جميع حدود المدركات الحسية السمعية الممكنة ؛ فكل تغيرات ضغط الهواء التى يمكن سماعها يجب أن يكون لها ترددات واتساعات تقع فى النطاق المبين بالشكل.

لم نتحدث منذ أمد طويل فى هذا الفصل عن الاختلافات فى النوع بين الأصوات ،ويرجع معظم السبب إلى أنه يمكننا عادة أن نفحص نوع الصوت بدلالة الترددات والاتساعات لمكوناته أى بدلالة طيفه .



شكل (٦ — ٩) طيف صوت مركب تبدو فيه المكونات التى فى القمة المشار اليها بالسهم مطموسة بالمكونات الأخرى ذات الاتساعات الأكبر.

وهناك على أى حال ،عامل أو عاملان إضافيان يجب أن نأخذهما فى الاعتبار . وأهم هذين العاملين هو ظاهرة تسمى " الطمس " masking ؛ اذ يقال إن صوتا ما مطموس بواسطة صوت ثان حينما لايمكن سماعه بسبب وجود الصوت الثانى . ومعظم ما أُجرى من دراسة على هذا الموضوع قد تمت باستخدام النغمات النقية أكثر من الأصوات المركبة مثل تلك التى توجد فى الكلام. ولكن العمل الذى تم لنا



شكل (٦-١٠) صوتان كل منهما يتكون من ثلاث موجات مضمحلة ، والقمم التى فى طيف الصوت الذى فى الجزء الأسفل من الشكل أعرض من تلك التى للصوت فى أعلى الشكل ، والمكونات التى فى الجزء الأسفل من الشكل ـ طبقا لذلك ـ مضمحلة إلى حد كبير . وهناك فرق سمعى ضئيل بين هذين الصوتين.

يبين أنه لو كان الاتساع - على سبيل المثال - لنغمة نقية ترددها ٣٥٠٠ د/ث هى ٤٠ ديسبل تحت اتساع نغمة ترددها ٢٥٠٠ د/ث ، فإن النغمة التى ترددها ٣٥٠٠د/ث لن تُسمع حينئذ لأنها مطموسة بنغمة أخرى . وهذا النوع من الدراسة يهمنا كثيرا عند تناولنا لإدراك أصوات الكلام . إنه يبين لنا أن القمة المشار إليها فى صوت مثل المبين فى شكل (٦ - ٩) بالسهم ↓ قليلة الأهمية من وجهة نظر المستمع لأنه من المحتمل عدم إمكان سماعها فى وجود المكونات الأخرى ذات الاتساعات الأكبر . ولسوء الحظ لايوجد هناك بحث كاف لهذه المسألة حتى نتمكن من أن نحكم بأى درجة من اليقين : أى القمم الأخرى ذات الأهمية الأقل يمكننا تجاهلها ، وأيها الذى يضيف شيئا ما إلى مجمل النوع total quality . إن مزيدا من الدراسة عن الطمس فى الأصوات المركبة ، سوف يساعدنا مساعدة عظيمة فى دراسة أطياف أصوات الكلام .

ونحتاج أيضا إلى مزيد من الأبحاث بالنسبة لمفهومنا للنماذج الموجية المضمحلة . إذ أن هناك الكثيرَ الذى لانعرفه عن أثر الدرجات المختلفة للاضمحلال . وهناك ما يشير بوضوح إلى أنه يوجد فرق ظاهرى طفيف بين صوت يتكون من ثلاث موجات مضمحلة اضمحلالا خفيفا كما هو مبين فى الجزء الأعلى من شكل (٦ - ١٠) وبين الصوت ذى الموجات الثلاث المضمحلة اضمحلالا شديدا الموضحة أسفل منه مباشرة . ولكنه ليس فى الإمكان أن نقول كثيرا عن حدود هذه الظاهرة فى اللحظة الراهنة .

الفصل السابع

انتاج الكلام

حينما نتحدث فإننا نستخدم ألسنتنا وشفاهنا وأعضاء النطق الأخرى لانتاج أصوات الكلام المختلفة ،وتعطيناكثير من الكتب التى تدور حول الكلام وصفا لأعضاء النطق vocal organs التى تصاحب هذه الأصوات المختلفة ،ولكن مع استثناء واحد أو اثنين وهو قلة المحاولات التى بذلت لتوضيح الكيفيات التى تُوَلّدُ بها حركات أعضاء النطق التغيرات فى ضغط الهواء بكل صوت من أصوات الكلام . وليس من أهداف هذا الكتاب إعطاء تفسير مفصل لجميع أصوات الكلام المختلفة. ولكننا فى هذا الفصل سوف نتناول طريقة إنتاج كل نمط من الأنماط types الرئيسية للأصوات التى توجد فى الإنجليزية .

أشرنا فى أول هذا الكتاب إلى أنه يجب أن يكون لكل صوت حركة مناظرة لمصدر صوتى ، ففى معظم أصوات الكلام تعمل اهتزازات الهواء فى ممرات : الفم والقصبة الهوائية والأنف (وتعرف جميعا بالممر الصوتى). وهى تعمل بوصفها حركات لتكوين الموجات الصوتية . فالممر الصوتى ينتهى فى إحدى نهايتيه بالوترين الصوتيين، أما فى الأخرى فينفتح على الهواء الموجود خلف الشفتين وفتحتى الأنف، وبذلك يُكَوِّن حجرة رنين ذات تشكيل معقد،وحين يُطْلَقُ الهواء فى هذه الحجرة بدفقة شديدة sharp tap فإنه يهتز بطريقة معقدة.وهذه الاهتزازات هى التى تسبب موجات الصوت التى نسمعها .

والدفقات التى تطلق الاهتزازات فى الهواء الموجود فى الفم والقصبة الهوائية إنما ترجع إلى عمل الوترين الصوتيين فى الهواء المندفع خارج الرئتين. فالهواء يُضْغَطُ داخل الرئتين بتأثير عضلات التنفس . وحينما يكون الوتران الصوتيان - وهما فى الواقع ثنيات صغيرة من العضلات والغضاريف فى الحنجرة - حينما يكونان

ملتصقين، فإن الضغط ينشأ تحتهما . وإذا كان هذا الضغط من القوة بما يكفى فإن الوترين الصوتيين قد يُدفعان بعيدا بعضهما عن بعض حيث ينطلق هواء الرئتين بينهما . وهذا الانطلاق المفاجىء للهواء المضغوط يعمل كدفقة حادة للهواء الموجود فى الممر الصوتى الذى يبدأ فى الاهتزاز تبعا لذلك .

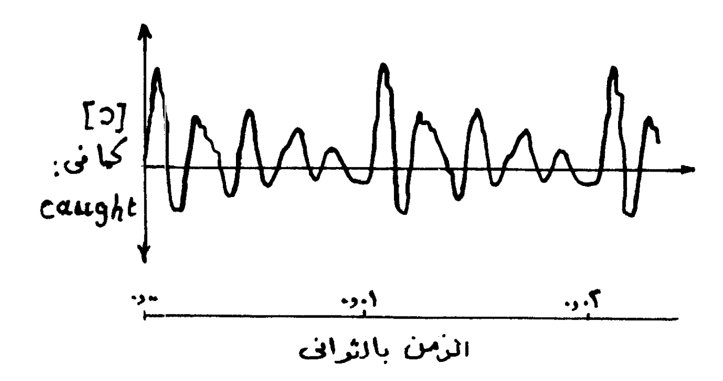
ومن الطبيعى أن يهتز الهواء الموجود فى الممر الصوتى بطرق مختلفة حينما تكون أعضاء النطق فى أوضاع مختلفة . وكما قررنا فى الفصل الخامس ، فإن الطريقة التى تهتز بها كتلة من الهواء تتوقف على حجمها وشكلها . وأما التغيرات فى شكل الممر الصوتى فتحددها إلى درجة كبيرة حركات اللسان والشفتين والحنك اللين. وسوف يكون هناك نمط مميز لاهتزاز الهواء يناظر كل وضع لأعضاء النطق هذه .

نستطيع الآن أن نرى كيف تتولد الأشكال الموجية للأصوات الصائتة التى ناقشناها فى الفصل الثالث . فالشكل الموجى للصائت [ɔ] كما فى كلمة Caught معاد هنا فى الشكل رقم (٧-١) . . وكما سبق أن لاحظنا فإنه يتكون من سلسلة من الموجات المضمحلة التى تتّابع فى هذه الحالة بمعدل ١٠٠ د/ث . وكل من هذه الموجات المضمحلة نتجت باهتزاز الهواء فى الممر الصوتى والتى تتّابع فى كل وقت توجَد فيه نبضة pulse من الوترين الصوتين . وهكذا تتولد سلسلة من الموجات المضمحلة من هذا النوع مادامت أعضاء النطق موجودة فى المواضع المخصصة لنطق هذا الصائت ، ومادام الوتران الصوتيان يُتابعان إصدار النبضات .

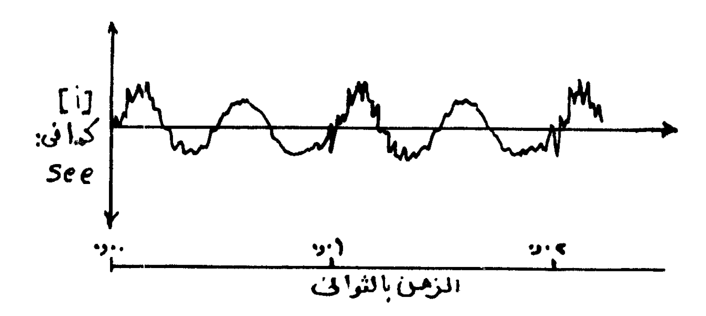
أما حينما تأخذ أعضاء النطق وضعا آخر ، كالوضع المخصص لنطق الصائت [i] فى كلمة See ، تتولد سلسلة أخرى من الموجات المضمحلة ، ويمكنك أن ترى من الشكل (٧-٢) ، وهو تكرار لجزء آخر من شكل (٣ - ٣) ، أن الشكل الموجى له على الأقل مكونان رئيسيان يمكن تمييزهما بالعين . والحق فإنه ربما كان من الأفضل أن ننظر إلى

الشكل الموجى للصائت [أ] فى كلمة See كما لو كان أكثر شبها بحاصل جمع ثلاث موجات مضمحلة ،وحتى هذا القول يعتبر تبسيطا مادامت توجد بعض المكونات الإضافية الأقل حجما والموجات المضمحلة ذات الترددات الملائمة موضحة فى الشكل (٧ - ٣) ،فكل مرة تحدث فيها نبضة من الوترين الصوتيين ، ينطلق الهواء الموجود فى الفم والصدر مهتزا بجميع هذه الطرق الثلاثة اهتزازا متزامنا (قارن الشكل ٣ - ٢ الذى يبين وترا مشدودا يهتز بطرق متعددة فى وقت واحد) فالصوت [أ] هو مجموع هذه الاهتزازات ،وله مكونات فى طيفه عند الترددات المناظرة .

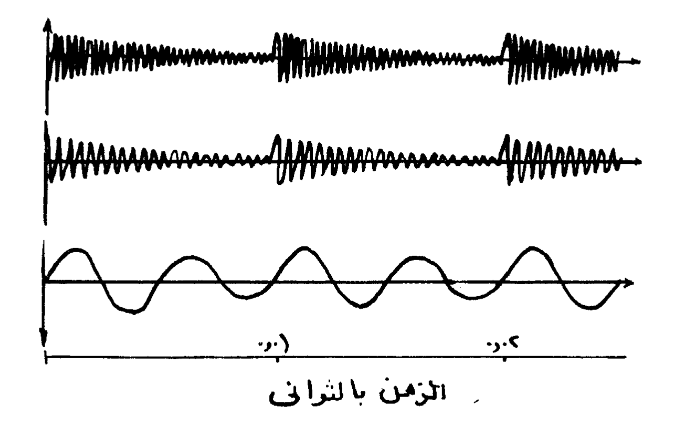
والقمم فى أطياف الصوائت (وسوف نرى أنها كذلك بالنسبة لبعض أصوات الكلام المعينة الأخرى) ،تناظر الترددات القاعدية لاهتزازات الهواء فى الممر الصوتى . ومناطق الطيف التى تحتوى على مكونات ترددية كبيرة نسبيا (أى المناطق الواقعة حول هذه القمم) تسمى "بالحزم" Formant . وبذلك تكون الحزم لصوت ما هى جوانب لهذا الصوت ، تتوقف مباشرة على شكل الممر الصوتى ،وهى مسئولة إلى حد كبير عن الخاصية المميزة للنوعية ،فالصائت [ɔ] الذى نطقه المؤلف يُمَيِّزُ جزئيا بحزمة حول ٥٠٠ د/ث والصائت [أ] ،يميز بحزم حول ٢٢٠، ٢٣٠٠ و ٣٥٠٠ د/ث . وحينما تُنطق هذه الصوائت فسوف توجد مكونات كبيرة نسبيا مناظرةً لمكونات موجية مضمحلة بهذه الترددات القاعدية . إن وجود هذه المكونات المميزة (هذه الحزم) هو الذى يمكننا من أن نتعرف على الصوائت المتعددة المرتبطة بالأوضاع المختلفة لأعضاء النطق .



شكل (٧ -١) الشكل الموجى الناتج من نطق المؤلف
للصائت [ɔ] كما فى كلمة Caught



شكل (٧ - ٢) الشكل الموجى الناتج من نطق المؤلف
للصائت [i] كما فى كلمة See



شكل (٧ - ٣) ثلاث موجات مضمحلة (العليا ذات تردد قاعدى قدره ٣٥٠٠ د/ث ،والوسطى ذات تردد قاعدى قدره ٢٢٠٠ د/ث ، والسفلى ذات تردد قاعدى قدره ٢٠٠ د/ث ،وكل منها ذات تردد أساسى قدره ١٠٠ د/ث (١) . فلو أضيفت هذه الأشكال الموجية الثلاث معا ،فإنها سوف تنتج موجة صوتية شديدة الشبه بتلك التى للصائت [أ] كما فى كلمة See

لم نعالج فيما مضى عمل الوترين الصوتيين بأى تفصيل،وإنما لحظنا فقط أن النبضة تحدُث حينما يصبح ضغط هواء الرئتين قويا

---

(١) التردد القاعدى basic غير التردد الأساسى: Fundamental فالثلاث موجات السابقة لها ثلاث ترددات قاعدية مختلفة ،ولكن لها تردد أساسى واحد قدره ١٠٠ د/ث . انظر الفرق بينهما فى الفصل الخاص بتوضيح المصطلحات الهامة فى آخر الكتاب .

(المترجم)

بما يكفى لكى يجبر الوترين الصوتيين على الانفراج. وفى أصوات كلامية كثيرة (مثل الصائت [ɔ] و [أ] اللذين كنا نتحدث عنهما) ،فإن الوترين الصوتيين ينتجان عادة سلسلة من النبضات. فبمجرد ما يُحْمَلُ الوتران على التباعد،فإن بعض هواء الرئتين يهرب منهما ،وهذا التيار من الهواء يساعد فعلاعلى أن يعود الوتران إلى الالتصاق بعضهما ببعض مرة ثانية. وحينما يصبحان ملتصقين فإن الضغط سوف يتزايد مرة أخرى إلى أن يتمكن هواء الرئتين من فتح الوترين بعيدا عن بعضهما مرة ثانية حيث تتكرر الدورة كما سبق .

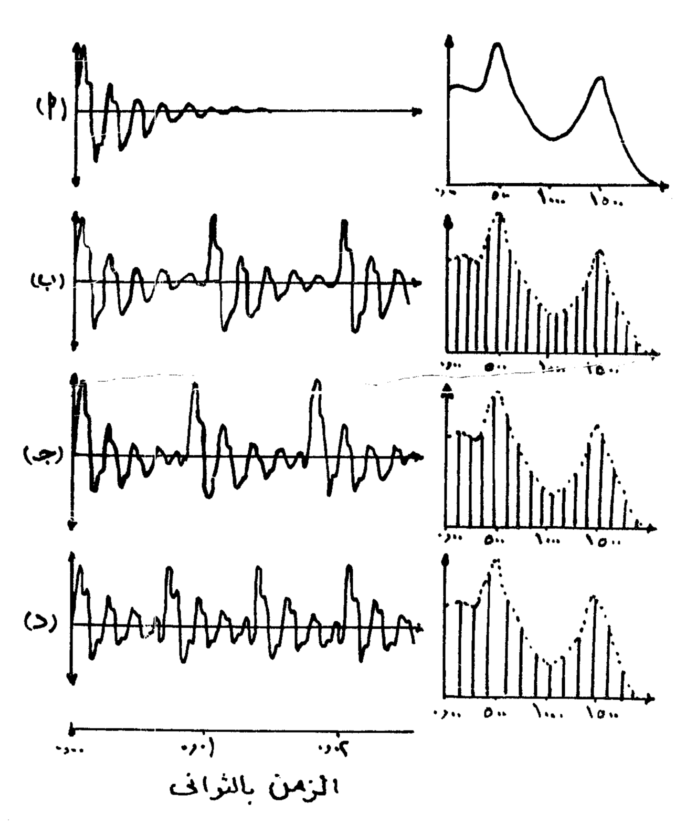
ومن المهم أن ندرك أن حركات الوترين الصوتيين ليست كافية فى حد ذاتها لإطلاق الاهتزازات التى نسمعها كأصوات . ولكن حيثما يُدفَع الوتران الصوتيان للانفراج عن بعضهما فإن الضغط المنطلق يعمل مثل دفقة شديدة على الهواء الموجود فى حيز الممر الصوتى. وكل هذه الدفقات تجعل كتلة الهواء التى فوق الحبلين الصوتيين تهتز وفقا لتردداتها الطبيعية (تردد الحزم) فإذا أُطلق الوتران بعيدا عن بعضهما كل $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية،فإن الاهتزازات المضمحلة سوف تبدأ بمقدار ١٠٠ مرة فى الثانية . وأما الشكل الموجى المركب الذى يُنتَج خلف الشفتين فإنه سوف يتكرر بالمعدل نفسه. وهذه النقطة مبينة فى الشكل (٧ - ٤) الذى يوضح الموجات الصوتية المناظرة لصوت مركب كهربائيا ذى شكل موجى أبسط قليلا ،ولكن يستحيل تقريبا تمييزه من الصائت [ɔ] الموجود فى كلمة Caught.
فالموجة (أ) ناتجة من نبضة واحدة ، والموجة (ب) ناتجة من نبضات تتابع كل $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية ،والموجتان (جـ) و (د) ناتجتان من نبضات بمعدلين آخرين. (ولقد استُخدِم جهازٌ صناعى لتخليق الكلام artificial synthesizer فى إنتاج الأصوات التى يشتمل عليها هذا الرسم البيانى لكى يتأكد لنا أن الفرق الوحيد بين الأصوات هو المعدل التى تحدث به النبضات) .

لقد رأينا فى الفصل الرابع أنه من الملائم اعتبار الاشكال الموجية التى تشبه تلك الموجودة بالشكل (٧ - ٤) ب - كما لو

كانت مجموع عدد من المكونات لكل منها تردد هو عبارة عن المضاعفات الصحيحة للتردد الأساسى (أى إنه التردد الناتج من الموجة المركبة). وعلى ذلك فالموجة فى الشكل (٧ - ٤) ب سوف تكون ذات مكونات هى مضاعفات صحيحة للعدد ١٠٠ مادامت هذه الموجة المركبة تتكرر ١٠٠ مرة فى الثانية. والواقع أن طيف هذا الصوت هو على النحو الموضح فى يمين الشكل ، والمكون الموجى الذى تردده ٥٠٠ د/ث له أكبر اتساع (وهذا لا يدهشنا مادامت الموجة المضمحلة التى تكررت ذات تردد أساسى قدره ٥٠٠ د/ث). وبالإضافة إلى ذلك هناك قمة أخرى فى الطيف عند التردد ١٥٠٠ د/ث الذى يناظر الموجات الأصغر التى تمثل المكونات العليا[٢] للشكل الموجى الرئيسى المضمحل. وفى القسمين (ج) ، (د) فى الشكل (٧ - ٤) تَكَوّن الأشكال الموجية وأطياف نفس الصوت الشبيه بالصائت على درجة أكثر ارتفاعا ، أى حينما تنتج النبضات عند ١٢٠ ، و ١٥٠ د/ث . ويمكنك أن ترى أن هذه الموجات تتكون جميعها من تكرارات لموجة مضمحلة ذات تردد قاعدى قدره ٥٠٠ د/ث ، وموجة أخرى ترددها القاعدى حوالى ١٥٠٠ د/ث. وأكثر من ذلك فإن الأطياف المبينة على يمين الشكل يماثل كل منهما الآخر نوعا من التماثل ، فمن الممكن أن نرسم منحنى ذا قمم عند ٥٠٠ وعند ١٥٠٠ د/ث حولها جميعا. والفرق بين هذين الطيفين الأخيرين هو أن المكونات الترددية هى مضاعفات الموجة ذات التردد ١٢٠ والموجة ذات التردد ١٥٠ ، ولذلك فقد مُثّلت بخطوط أكثر تباعدا.

وهذا التحليل - بطبيعة الحال - يتفق مع القاعدة التى وردت فى الفصل الرابع (ص ٦٨ وما بعدها) . التى تقرر أنه عندما تكون الموجة المركبة مكونة من شكل موجى مضمحل يتكرر على فترات منتظمة ، فإن مكونات التردد سيكون لها دائما نفس الاتساعات النسبية التى تماثل المكونات المناظرة لها فى الطيف المستمر الذى يمثل بدوره الموجة المضمحلة حين توجد منفردة. وبناء على ذلك فان تغيير المعدل الذى يُنْتِج به الوتران الصوتيان النبضات سوف يؤثر على التردد الأساسى للموجة المركبة ، ولكنه لن يغير الحزم (القمم التى فى الطيف) التى تناظر الترددات الرئيسية لاهتزازات الهواء

المفضلة فى الممر الصوتى. لكل ذلك يمكننا القول بأن الحـــــزم لصوت ما هى صفات لشكل الفم الذى أنتجها.



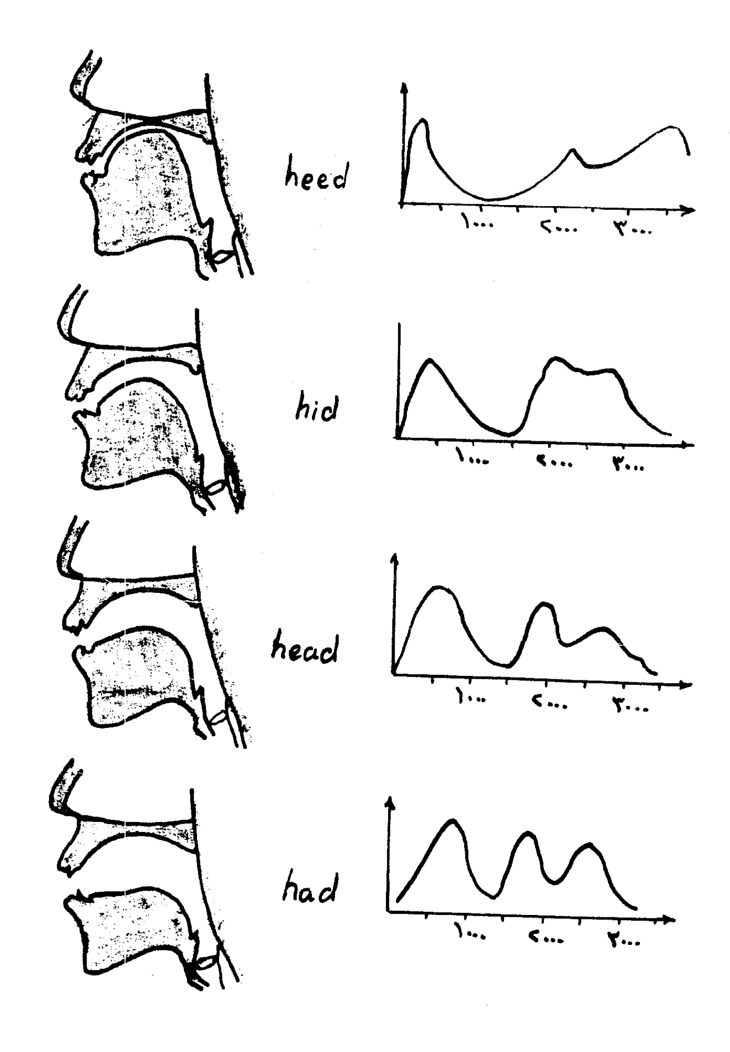
شكل (٧ - ٤) الأشكال الموجية والأطياف للصائت المخلق المشابه للصائت [ɔ] كما فى Caught. والرسم (أ) يبين تأثير نبضة مفردة على جهاز الرنين و (ب) يبين نبضات متتالية بمعدل ١٠٠ نبضة / ث و (جـ) ١٢٠ نبضة / ث و (د) ١٥٠ نبضة / ث .

المضمحلة فى الممر الصوتى . لكل ذلك يمكننا القول بأن الحزم لصوت ما هى صفات لشكل الفم الذى أنتجها.

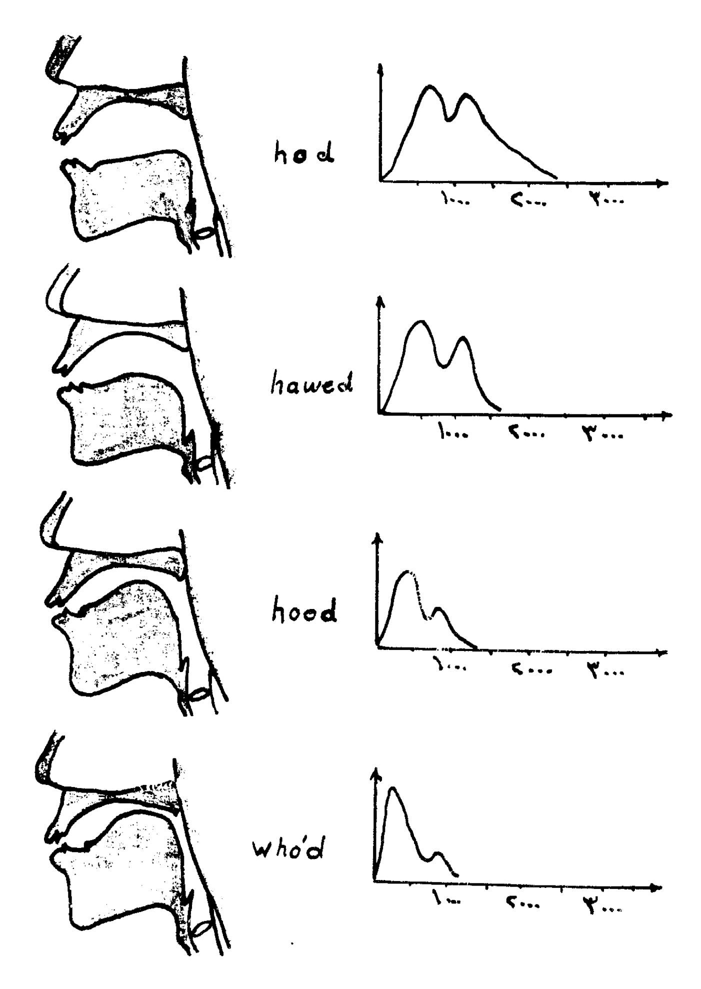
وحيث أن المنحنى المستمر كما فى شكل (٧ - ٤) (أ) هو أوضح طريقة لتمثيل الحزم التى تميز صائتا ما، بصرف النظر عن المعدل الذى تصدر به النبضات من الوترين الصوتيين، فإننا سوف نستخدمه غالبا ، مفضلين إياه على الطيف الخطى حينما نكون بصدد دراسة الطبيعة الأكوستيكية لنوع الصائت، وسوف نصف الصائت بدلالة الطيف الخطى كما فى شكل (٧ - ٤) (ب ،ج ،د) وذلك حينما نريد فقط أن نركز الانتباه نحو الترددات الأساسية الخاصة المستخدمة.

رأينا فى الفصل السادس أن درجة الصوت تعتمد اعتمادا رئيسيا على التردد الأساسى ،وتبعا لذلك فحين يتغير معدل انتاج النبضات بواسطة الوترين الصوتيين ،سيحدث أيضا تغير فى درجة الصوت (بالرغم من انعدام التغير فى الحزم، وبالتالى انعدام التغير فى خصائص نوعية الصائت) ،ونحن نتحكم فى التغيرات التى تحدث للدرجة بالتحكم فى العضلات التى تسيطر على الوترين الصوتيين.وحينما يزداد التوتر لدرجة يصبح معها الوتران مشدودين تماما ،فإنهما يتحركان بسرعة أكثر ،وبذلك ينتجان عددا أكبر من النبضات فى الثانية وهى المطلوبة لإنتاج صوت ذى درجة مرتفعة . ومن الناحية الأخرى،فعند نطق كلمة بدرجة منخفضة فإن الوترين يكونان مرتخيين فقط أثناء تلاصقهما ،حتى أنهما حين يبتعد بعضهما عن بعض نجدهما يستغرقان وقتا أطول - إلى حد ما - لكى يعودا إلى وضع الإغلاق.

ويمكن عادة تغيير درجة الصوت الصائت بدون تغيير الخصائص المميزة لنوعيته ،لأن كلا من هذين العاملين محكوم بآلية فسيولوجية مستقلة : فكما رأينا ،تتوقف الدرجة على عمل الوترين الصوتيين، والخصائص المميزة للنوعية تعتمد إلى حد كبير على الحزم ،وهى ذات قيم معينة ثابتة لكل شكل من أشكال الممر الصوتى على حدة ،والشكل (٧ - ٥) يبين أطياف بعض الصوائت بنطق المؤلف وهى الموجودة فى أواسط الكلمات [من اليمين الى اليسار] heed ← hid ← head ← had ← hod ← hawed ← hood ← Who'd ويبين أيضا أوضاع النطق



شكل (٧-ه) أوضاع النطق (مبنية على معلومات مستقاه من صور فوتوغرافية بالاشعة السينية للمؤلف)وأطياف أصوات الصوائت التى فى أواسط الكلمات ← heed ← hid ← head - had (من اليمين الى اليسار) وذلك بنطق المؤلف



تابع شكل (٧ ـ ٥) أوضاع النطق وأطياف أصوات الصوائت التى فى أواسط الكلمات من اليمين إلى اليسار
who'd ← hood ← hawed ← hod
وذلك بنطق المؤلف .

المناظرة لأعضاء النطق . وهذه المنحنيات تعطى توضيحا طيبا جدا لمكونات التردد المميزة لكل من هذه الاصوات. ويمكننا أن نعتبر أن كل قمة توضح التردد القاعدى لواحدة من الموجات المضمحلة الموجودة. فالصائت الموجود فى الجزء المتوسط من كلمة had - على سبيل المثال - سيميز بأنه يحتوى على مكونات ذات اتساعات كبيرة نسبيا فى ثلاث مناطق رئيسية حول ٧٠٠ د/ث ، ١٧٥٠ د/ث ، ٢٦٠٠ د/ث . وتتولد الموجات المضمحلة التى لها هذه الترددات القاعدية فى كل مرة ينبض فيها الوتران الصوتيان .

وإذا أردت أن تعبر عن ذلك بمصطلحات موسيقية ، فيمكنك أن تقول : كل صائت يناظره وتر يميز هذا الصائت ، وبسبب النبضات من الحنجرة ، فإن هذا الوتر تتم إثارته مرات عديدة فى الثانية . والنظر إلى أصوات الكلام على هذا النحو ليس فيه جديد يذكر . فمنذ مدة طويلة فى عام ١٨٢٩ قال روبيرت ويليس Robert Willis "إن أى صائت هو مجرد التكرار السريع لنغمته الخاصة" وهذا تبسيط شديد لأن ويليس لم يدرك أن كثيرا من الصوائت لايميزها تردد واحد لكل منها وإنما تتميز بمجموعة من الترددات ؛ ولكننا لو حورنا قليلا فى ملاحظته وقلنا إن أى صائت هو مجرد التكرار السريع لوتره الخاص فسيكون لدينا عبارة تتفق مع معطيات الشكل رقم (٧ - ٥) بطريقة أفضل .

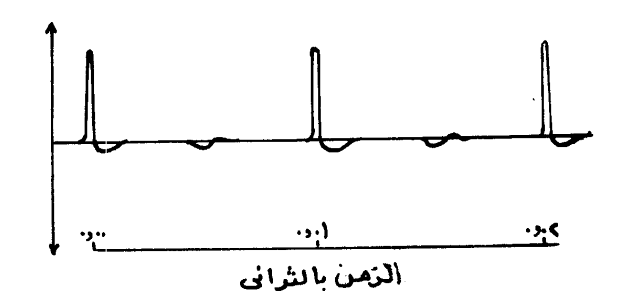
وهناك طبعا طرق ممكنة أخرى لوصف إنتاج الأصوات الصائتة . ومن الطرق الشائعة تلك التى استخدمها مارتن جوس Martin Joos فى كتابه الرائع المتخصص والمسمى علم الأصوات الأكوستيكى Acoustic Phonetics (انظر فى الدليل المفصل للمراجع) . وترى هذه الطريقة أن النبضة الصوتية الصادرة من الحبلين الصوتيين هى موجة تتأثر ضرورة بمرورها فى الممر الصوتى . ومن المفترض أن الشكل الموجى للنبضة الحنجرية تتميز شكلا كما هو موضح بالشكل (٧ - ٦) . وطيف موجة من هذا النوع يتكون من عدد كبير من التوافقيات ذات الاتساعات المتناقصة . فإذا كان الشكل الموجى

من النوع الاكثر انتظاما كالمبين فى الشكل (٧ - ٧) ،فإن الطيف سيكون بالضبط كما هو مبين بالشكل (٧ - ٨)٠ وهذا النوع من الأشكال الموجية يعتبر كإشارة تحدث بالوترين الصوتيين ،وعندئذ يقال إنها جرى تعديلها بفعل الترشيح filtering action الذى يقوم به الممر الصوتى الذى ينقل بعض التوافقيات بكفاءة أكبر من بعضها الآخر ٠ ويترتب على ذلك أن طيف الشكل الموجى بعيدا عن الشفتين سوف يصبح ذا قمم فى المناطق التى تعتمد على الخواص الترشيحية للممر الصوتى ٠ وما دامت خصائص الممر الصوتى تعتمد على شكله، فإن مواضع هذه القمم تحدد فى الواقع بالوضع الذى تكون عليه أعضاء النطق ٠

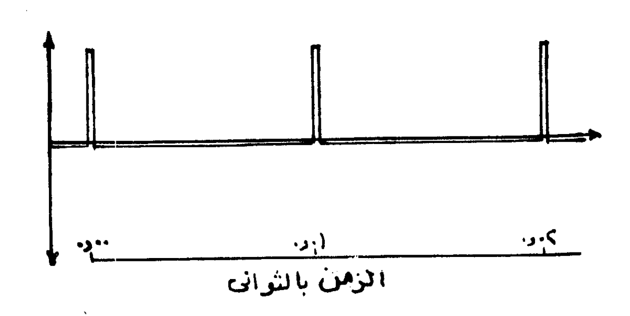
وهذه الطريقة فى وصف إنتاج اصوات معينة من أصوات الكلام تمتاز بأنها تسمح ببساطة بوجود تغيرات فى شكل النبضة الناتجة من الوترين الصوتيين، ولقد وافقنا ضمنا فى دراستنا على أنه لاخلاف فى ذلك ٠ غير أن هذا يختلف كثيرا فى الواقع من شخص لآخر؛ إن هذه التغيرات سوف تؤثر على الموجة المركبة (بالرغم من أن هذه التغيرات لا تصل فى العادة إلى درجة يحدث معها فرق واضح فى الحزم المميزة للأصوات)٠

ومن ناحية أخرى،فإن طريقتنا القائمة على اعتبار أن الممر الصوتى آلية لانتاج الموجات المضمحلة التى تتابع فى كل مرة تصدر فيها نبضة من الوترين الصوتيين تعتبر من نواح كثيرة وسيلة أدق لوصف انتاج العناصر الأكوستيكية التى تميز الصوائت وأصوات الكلام الأخرى ٠ فهذه الطريقة تؤكد بصدق أن ترددات الحزمة تناظر الترددات القاعدية لاهتزازات الهواء فى الممر الصوتى ٠

وإذن فالصوائت تتميز إلى هذه الدرجة بواسطة ترددات حزمها الصوتية ، ولذلك كان من الأنسب غالبا أن نمثلها برسم بيانى فى



شكل (٧-٦) الشكل الموجى للنبضة الحنجرية طبقا لوجهة نظر جوس (ولقد بينت الأبحاث الحديثة أن الشكل الموجى الحقيقى لايشبه عادة هذه النبضة الضيقة).



شكل (٧ - ٧) شكل مبسط للموجة المبينة بالشكل (٧ - ٦).



شكل (٧ - ٨) طيف الموجة المبينة فى شكل (٧ - ٧).

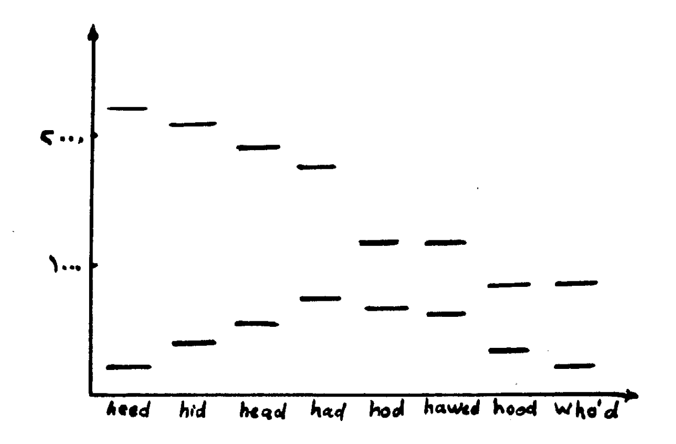
شكل (٧ - ٩) وقد أنشأناه خصيصا لتوضيح هذه الفكرة. وهذا الرسم البيانى المقام على المعلومات المستقاه من الشكل (٧ - ٥) ، يستخدم البعد الرأسى لكى يشير إلى ترددات الحزم التى تميز الصوائت المختلفة . وهو يشبه من بعض الجوانب الصورة المرئية للكلام التى ينتجها راسم الطيف الصوتى sound spectrograph. وهو آلة تحلل الموجات الصوتية آليا من حيث مكونات التردد فى هذه الموجات . وترسم هذه الآلة علامات على صفحة من ورق خاص بطريقة تجعل المقياس الأفقى يبين الزمن الذى يحدث فيه صوت معين ،وأما المقياس الرأسى فيبين مكونات التردد التى توجد فى الأوقات المبينة على المقياس الأفقى وتشير درجة لون هذه العلامات إن كانت فاتحة أو داكنة إلى اتساعات المكونات المختلفة. وفى كتاب المؤلف القادم " الكلام فى المعمل" Speech in the laboratory توضيح مفصل للكيفية التى تستخدم بها هذه الآلة.

والشكل (٧ - ٩) هو واحد من الرسوم البيانية الرئيسية فى دراسة أكوستيكية الكلام. وهو - كما قلنا - مستنبط من المنحنيات المبينة فى شكل (٧ - ٥) والتى تم الحصول عليها فعلا بمساعدة راسم الطيف الصوتى. ولكننا نستطيع مع ذلك أن نتحقق من بعض هذه المعلومات بدون استخدام لأى آلات . فمن الممكن على سبيل المثال أن نطلق الهواء فى الممر الصوتى لكى يهتز بطريقة تجعل الموجة المضمحلة

المناظرة لأدنى حزمة تصدر باتساع أكبر من المكونات الأخرى،ويمكن أن يحدث هذا بأن نطرق اصبعنا بخفة على القصبة الهوائية أعلى الحنجرة تماما أثناء ايقافنا للتنفس بواسطة وقفة حنجرية glottal stop [كالهمزة] (وهو الصوت الذى تستخدمة طائفة الكوكنى Cockney ومتحدثو لهجات أخرى فى وسط كلمة bottle) وحينما تفعل ذلك تَنتُج لك نغمة غيرواضحة مثل الصدى • وهذا الصوت يتكون أساسا من موجة مضمحلة ذات تردد قاعدى يناظر ذلك الذى للحزمة الأولى•

إذا نظرت للشكل (٧ - ٩) فسوف ترى أن الحزمة الأولى(أى أدنى قمة فى الطيف) تكون عند تردد منخفض للكلمة heed (٢٢٠ د/ث)، وتكون على ارتفاع أكثر قليلا لكل من الكلمات : hid (٤٠٠ د/ث) و head (٥٥٠د /ث) و had(٧٥٠ د/ث)•فإذا هيأت أعضاءك الصوتية فى الأوضاع اللازمة لنطق الصوائت لكل من هذه الكلمات ثم طرقت بإصبعك طرقة خفيفة على القصبة الهوائية أثناء وقفة حنجرية ،فإنك سوف تُنتِج نغمة ذات درجة منخفضة للكلمة heed،وأكثر ارتفاعا بقليل لكل من الكلمات [من اليمين الى اليسار] hid ← head ← had• وأما مع باقى كلمات هذه السلسلة فإن تردد الحزمة الأولى يأخذ فى التناقص•

وعلى ذلك فإنك إذا كررت هذه المحاولة بينما تهيىء أعضاء النطق للصوائت فى الكلمات الآتية : [من اليمين الى اليسار] : hod ← hawed ← hood ← who'd فإنك سوف تصدر سلسلة من النغمات التى تتناقص فى درجتها• والترددات الحقيقية للنغمات التى تصدرها ربما اختلفت - بطبيعة الحال - عن تلك المبينة أعلى هذا الكلام ،والتى هى عبارة عن قيم تقريبية مبنية على تحليلٍ لكلام المؤلف، وربما لاتكون ذا لكنة مختلفة فحسب بل تكون ذا ممر صوتى مختلف • وكلا هذين الملمحين features سوف يؤثر على القيم المطلقة لترددات الحزم ولكنهما من المحتمل ألا يؤثرا على التنظيم النسبى للأصوات التى تصدرها•



شكل (٧ - ٩) رسم طيفى يبين ترددات الحزمة الأولى والثانية لبعض الصوائت الانجليزية كما نطقها المؤلف .

ويمكننا أن نُجرىَ اختبارا تقريبيا على تردد الحزمة الثانية لكل من هذه الصوائت بأن نهمس الكلمات ،فحينما تَهْمِس فإن الحبلين الصوتيين يصبحان منفرجين قليلا ،ولذلك فإن الهواء يندفع خلالهما من الرئتين مسببا تغييرا بسيطا فى ضغط الهواء مما يجعل الهواء يهتز فى الممر الصوتى. ومن بين الترددات القاعدية التى تكون غالبا أكثر قابلية للسمع تحت هذه الظروف الترددات الخاصة بالحزمة الصوتية الثانية وما هو أعلى. فاذا اهمست الكلمات الاتية [من اليمين الى اليسار]

who'd ← hood ← hawed ← hod ← had ← head ← hid ← heed

فإنك سوف تستمع إلى تناقص تدريجى للدرجة الظاهرة . ويمكنك أن ترى من خلال الشكل (٧ - ٩) أن ذلك يتوازى مع الطريقة التى تصبح بها الحزمة الثانية متناقصة تدريجيا لكل الصوائت فى هذه السلسلة . ويجب أن يلاحظ - على أى حال - أن هذه

الطريقة تقريبية جدا للتحقق من أحد الترددات القاعدية المرتبطة بصائت ما. وحينما نهمس كلا من الكلمات الأربع الأوائل فى أول السلسلة heed ← hid .. إلخ فإن درجة الصوت المهموس ربما تتجاوب إلى حد ما مع تردد الحزمة الثانية. أما بالنسبة للكلمات الأربع الأخيرة فحينما تقترب القمتان من بعضهما إلى حد كبير، وحينما يكون الاتساع لأوطى القمتين أكبر نسبيا فربما كانت درجة الهمس أكثر تجاوبا مع القمة الأولى أكثر منها مع الثانية.

ومن المعتاد أن يقال إن أوطى القمم فى الطيف (أى الحزمة الأولى) تتجاوب مع الطريقة التى اهتز الهواء بها فى الحجرة الضخمة فى القصبة الهوائية خلف أعلى نقطة فى اللسان، على حين ترجع القمة الثانية فى الطيف إلى النمط الطبيعى لاهتزاز الهواء فى الفم أمام أعلى نقطة فى اللسان. وفى الحقيقة فإن الهواء يهتز فى الممر الصوتى ككل. ونحن لانستطيع بأى حال أن ننظر إلى تجاويف القصبة الهوائية والفم على أنها تجاويف مستقلة. وعلى أى حال فهناك علاقات محددة بين ترددات الحزم من جهة وأحجام وأشكال حجرات الرنين من جهة أخرى، وبعض هذه العلاقات يمكن رؤيتها بمقارنة رسوم الممر الصوتى المبين بالشكل (٧ - ٥) مع الأطياف المناظرة.

وبصفة عامة فإن جميع ترددات الحزم تتوقف على ثلاثة عوامل هى :- موضع النقطة التى يحدث فيها أقصى تضييق فى الممر الصوتى. (وهو محكوم بحركة اللسان الخلفية والأمامية) وحجم أو المساحة المقطعية لأقصى تضييق(هو محكوم بحركة اللسان تجاه سقف الفم وظهر القصبة الهوائية أو بعيدا عنهما) وأما العامل الأخير فهو موضع الشفتين.

أما بالنسبة لصوائت مثل تلك التى فى الكلمات الآتية (من اليمين إلى اليسار) :

had ← head ← hid ← heed.

فإن السبب الرئيسى للتغير فى تردد الحزم الأولى هو التغير فى حجم أقصى تضييق فى الممر الصوتى. فاللسان ألصق ما يكون بسقف الفم بالنسبة للكلمة heed . أما بالنسبة لكل من الكلمات الأخرى فإنه يكون أقل التصاقا بدرجة صغيرة. وكقاعدة تقريبية يمكن القول إنه بالنسبة للصوائت التى من هذا النوع كلما زادت المساحة المقطعية لأقصى تضييق للممر الصوتى، فإن تردد أدنى حزمة تزداد أيضا. وبالنسبة للصوائت التى فى الكلمات [من اليمين الى اليسار] :

who'd ← hood ← hawed ← hod

فإن التغيير فى تردد الحزمة الأولى يحدده إلى حد كبير وضع النقطة التى يكون فيها أقصى تضييق ، ففى هذه الصوائت يكون التضييق فى الحلق أو مؤخر الفم، وفى أثناء هذه السلسلة فإنه يتحرك متقدما إلى الامام. وبينما تتحرك نقطة أقصى تضييق بعيدا عن فتحة المزمار فإن تردد الحزمة الأولى يقل .

ويتوقف كذلك التغير أساسا فى تردد الحزمة الثانية التى فى صوائت الكلمات [من اليمين الى اليسار] :

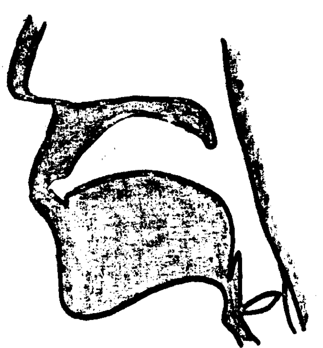
had ← head ← hid ← heed.

على التغير فى حجم أقصى تضييق فى الممر الصوتى. ولكن القاعدة فى ذلك عكس القاعدة المطبقة على الحزمة الأولى : فحينما تزيد مساحة التضييق ، فإن تردد الحزمة الثانية يتناقص ، ولكن التغير فى الحزمة الثانية يرجع أيضا إلى استدارة الشفتين. وعلى أى حال فإن هذه الحركة سوف تسبب بالإضافة إلى ذلك تناقصا فى الحجوم النسبية للقمة الثانية والقمم التى فوقها ، وفى سلسلة الكلمات [من اليمين الى اليسار] :

who'd ← hood ← hawed ← hod ← had ← head ← hid ← heed

تصبح الشفتان بالتدريج أكثر استدارة . وتتسبب حركة الشفتين فى الكلمات الأربع الأخيرة - دون حركة اللسان - فى تخفيض تردد قمة الرنين الثانية. مع ملاحظة أن الزيادة فى استدارة الشفة تكون مسئولة أيضا عن التناقص النسبى لاتساعى القمتين الثانية والثالثة للكلمات الأربع الأخيرة من السلسلة.

وكثير من الأصوات الأخرى للكلام تتكون بطريقة مماثلة للصوائت التى وصفناها الآن . فعلى سبيل المثال : الأصوات الأنفية nasal sounds مثل تلك التى فى نهايات الكلمات sing←sin←him والأصوات الجانبية laterals مثل التى فى بدايات ونهايات الكلمات : lull-little فإنها تتوقف أيضا على النبضات الصادرة من الوترين الصوتيين التى تجعل الهواء الذى فى الممر الصوتى يهتز. ولكل صوت من هذه الأصوات هناك أوضاع مميزة لأوضاع أعضاء النطق ،وعلى ذلك فإن منحنى رنينيا محددا يمكن أن يرادف كلا منها . وفى أثناء نطق الصوت الأول لكلمة : mat مثلا، تكون أعضاء النطق فى الوضع المبين بالشكل (٧ – ١٠) حيث الشفتان مغلقتان ولكن ممر الهواء إلى الأنف يكون مفتوحا.وهذا الشكل

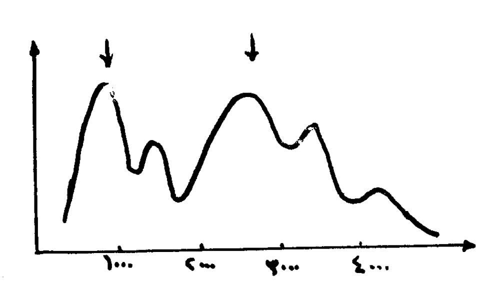


شكل (٧ – ١٠) وضع أعضاء النطق أثناء نطق [m] فى كلمة mat .

الخاص لممر الهواء له منحنى رنين يوضحه شكل (٧ – ١١) . وأكبر موجتين مضمحلتين تميزان هذا الصوت لهما تردد قاعدى يبلغ حوالى ٦٥٠ د/ث و ٢٥٠٠ د/ث .

وفى الصوائت الانجليزية والأنفيات والجانبيات يَنْتُج المصدر الرئيسى للطاقة الصوتية عن النبضات الحاصلة بواسطة الوترين الصوتيين ، ولكن تيار النَّفَس من الرئتين يمكن أن يُستخدَم ليُكَوِّنَ

أصواتا بطرق أخرى، وكنموذج للصوت الكلامى الذى لايعمل فيه الوتـران الصوتيان يمكن أن نجده فى أول كلمة Sip . فحينما ننطق هـذه الكلمة فإننا نبدأ بأن نرفع اللسان حتى يقترب من موّخر الأسنان العلوية الأمامية مكونا فجوة ضيقة جدا يندفع خلالها الهواء من الرئتين . ونتيجة لذلك يتجمع كثير من التغيرات الصغيرة شبه العشوائية فى ضغط الهواء لِتَكَوّن ضجة الهسيس ذات التردد العالى الذى يرتبط بالحرف S . أما الاتساعات النسبية لتردد المكونات فى هذا الصوت فقد تحددها إلى حد كبير شكل القناة الضيقة التى صنعها اللسان . ولكن شكل التجاويف فى القصبة الهوائية والفم سيكون لهما أيضا بعض التأثير على مكونات التردد.



شكل(٧ - ١١) منحنى الرنين للممر الصوتى أثناء نطق الصوت الأول من كلمة mat

فإذا حاولتَ مثلا أن تدير شفتيك قليلا حال النطق بالصوت S ، فسوف تجد أن هناك هبوطا فى درجة الصوت الظاهرية ،وعلى أى حال فإن هذا التأثير ضئيل بالمقارنة مع التغيرات الناتجة من تنوعات شكل الفجوة التى يُدفَع الهواء من خلالها . والقاعدة العامة فى ذلك

أنه كلما كانت الفجوة صغيرة كانت الدرجة الظاهرية للصوت أعلى.
ويمكن التحقق من ذلك بنطق الأصوات الآتية [من اليمين إلى اليسار]:
Fin ← thin ← shin ← sin كما في [f ← θ ← ʃ ← S]
فالقناة ذات الضيق الشديد عند بداية الكلمة sin تنتج ضجة عالية التردد. أما القناة التى هى أكثر اتساعا فتنتج الصوت الأقل درجة عند بداية كلمة shin. والقناة الأكثر اتساعا بين اللسان والأسنان الأمامية العليا عند بداية الكلمة thin تنتج صوتا أقل انخفاضا فى درجته. والقناة الشديدة الاتساع بين الشفة السفلى والأسنان العليا والتى تحدث عند بداية الكلمة Fin تنتج صوتا تتوزع فيه معظم الطاقة حتى على الترددات الأكثر انخفاضا.

وبعض أصوات الكلام تتكون من الآليتين اللتين سبق مناقشتهما. وعلى ذلك فإن الصوت الذى فى أول الكلمة ZOO مثلا هو نتيجة لإطلاق الهواء فى الممر الصوتى وهو يهتز بواسطة نبضات من الوترين الصوتيين ، ونتيجة أيضا - فى نفس الوقت - لإنتاج تغيرات إضافية فى ضغط الهواء بدفع الهواء خلال قناة ضيقة كما فى إنتاج الصوت [S] . والأصوات التى توجد فى بدايات الكلمات that-vat تتكون أيضا بمزيج من هاتين الآليتين الصوتيين .

ويعد أحد الأصوات التى يهمنا دراستها الصوت الذى يكتب عادة فى الانجليزية بالحرف [h] ، ففى هذا الصوت لايعمل الحبلان الصوتيان مثل عملهما حين ننطق صائتا ،كما أنه ليس هناك طاقة صوتية تتولد بدفع الهواء خلال فتحة ضيقة ،ولكن بدلا من ذلك فإن الهواء الآتى من الرئتين يكون ذا حرية نسبية فى المرور من خلال الممر الصوتى . غير أن التيار الهوائى حينما يمر خلال التجاويف الصوتية فإن بعض التغيرات الطفيفة فى ضغط الهواء سوف تحدث بفعل السطوح غير المنتظمة التى تعترض سريان الهواء. وتغيرات الهواء هذه سوف تكون كافية لأن تنتج اهتزازات ضئيلة جدا لكتلة الهواء التى فى الممر الصوتى . ولأن أوضاع أعضاء النطق أثناء

الصوت [h] هى نفس أوضاعها للصائت الذى يتبع الصوت [h] فإن مكونات التردد فى الصوت [h] تكون ذات اتساعات نسبية مشابهة لتلك التى فى الصوائت ،غير أن اتساع الموجة المركبة يكون أقل ولا يوجد لها تردد أساسى مادامت هذه الموجة لم تتولد عن طريق نبضات منتظمة من الوترين الصوتيين.

وقد يكون من المفيد أن ننهى هذه الدراسة التفصيلية لبعض الأصوات فى الإنجليزية ،بمختصر للأصوات الواقعة فى البدايات والنهايات من الكلمات [من اليمين الى اليسار] :

gig ← kik ← did ← tit ← bib ← pip

ومن الطبيعى أن الصوامت فى هذه الكلمات يجب أن ينظر إليها لا كأصوات فى ذاتها ،ولكن كطرق للبدء بالصوائت والانتهاء بها. وكل منها يتضمن تغيرا مفاجئا فى الشكل الموجى المرتبط بالصائت. فالصوامت فى الكلمات [من اليمين إلى اليسار] :

kik ← tit ← pip

مميزة عن تلك الموجودة فى gig ← did ← bib

وذلك بواسطة عمل الوترين الصوتيين . ففى المجموعة الأخيرة يبدأ الوتران الصوتيان فى توليد نبضات مبكرة فى نطق كل كلمة ثم تستمر فى هذا العمل لمدة أطول من المجموعة الأولى . وفى داخل كل مجموعة من المجموعتين تميز كلماتها جزئيا عن باقى الكلمات الأخرى بواسطة الاختلافات فى شكل الممر الصوتى .فأثناء الكلمة gig مثلا لايأتى اللسان فى وقت من الأوقات فى أحد الأوضاع الذى يمر بها أثناء نطق كلمة (did) إذا اردت أن تتحقق من ذلك حاول أن تقول جملة مثل:

did he get his gig ?

فربما وجدت أن ذلق اللسان فى أثناء نطق الكلمة الأولى ،لم يأت فى لحظة من اللحظات خلف الأسنان الأمامية السفلى، رغم أنه أثناء الكلمة الأخيرة وأثناء نطق جميع هذه الكلمة ،فإن مؤخر اللسان يرتفع تجاه الحنك اللين بينما يكون فى أثناء الكلمة الأولى مستويا فى الفم نسبيا) ،هذه الاختلافات فى شكل الممر الصوتى تؤثر على الصوائت لكل من هذه الكلمات ،وكذا شكل الممر الصوتى أثناء

تحركه إلى وضع إغلاق الصائت أو عند عودته من هذا الوضع مما يُنتج أيضا أصواتا مصاحبة لها نوعيات مميزة. ونحن نردف هذه النوعيات المختلفة بمختلف الصوامت التى فى أوائل هذه الكلمات وأواخرها.

وكثير من الاختلافات الأكوستيكية بين أصوات الكلام لم تُدرَسْ باستفاضة حتى الآن ، ومعظمها تقريبا مع ذلك يمكن أن يوصف باستخدام النظريات العامة التى جاءت فى هذه الكتاب، والذى نأمله أن يتمكن القارئ بمعرفة هذه الأسس من تفهم الموضوعات التى تناقشها البحوث المعاصرة فى علم الأصوات الأكوستيكى .

١- توضيح المصطلحات الهامة (١)

ملاحظة : الشروح المعطاه فى هذه القائمة يجب أن يُنظر إليها ليس كتعريفات ،ولكن كإرشاد عام يفيد القارئ الذى لم يتمرس بصفة خاصة بالرياضيات والفيزياء٠

الاتساع أو السعة : amplitude

هى الزيادة (أو النقصان) فى الضغط الجوى عند نقطة معينة أثناء الصوت، وفى الشكل الموجى المبين فى الشكل رقم (ت - ١)فإن الاتساع عند الزمن (أ) يحددها الخط (أ - أَ) ٠

جذر متوسط مربعات الاتساع : (ج٠م٠م) r.m.s amplitude

نوع من المتوسطات للاتساع يفيد خاصة عند دراسة الأشكال الموجية المركبة٠ وجذر متوسط مربعات الاتساع (وهو مرتبط ارتباطا غير مباشر بعلو الصوت)٠ مبين بخط متقطع فى الشكل رقم (ت - ١)٠

عرض الحزمة : bandwidth

هى مدى الترددات التى يستجيب أثناءها بكفاءة مِرْنان أومرشح، والاستجابة لمدخل input منتظم تعتبر كفئة غالبا فى نطاق التردد حين يكون للمخرج output اتساع قدرة ٧ر٧٠ ٪ على الأقل (أى أن قدرتها على الأقل ٥٠ ٪) من أقصى مخرج ٠

التردد القاعدى (٢) : basic frequency

انظر التردد frequency

---

(١) رتبت هذه القائمة طبقا للأبجدية اللاتينية لصعوبة ترتيبها على الأبجدية العربية لاقتران هذه المصطلحات بأشكال توضيحية مشتركة بين أكثر من مصطلحين ٠ (المترجم)٠

(٢) وهو خلاف التردد الأساسى ٠ (المترجم)٠

الموجة المركبـة : complex wave

أى موجة ليست ذات شكل جيبى .

مكـــون : component

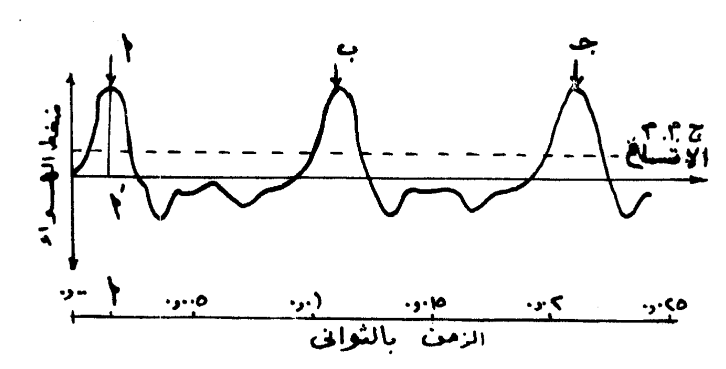
انظر تحت مكون التردد frequency component

دورة : cycle

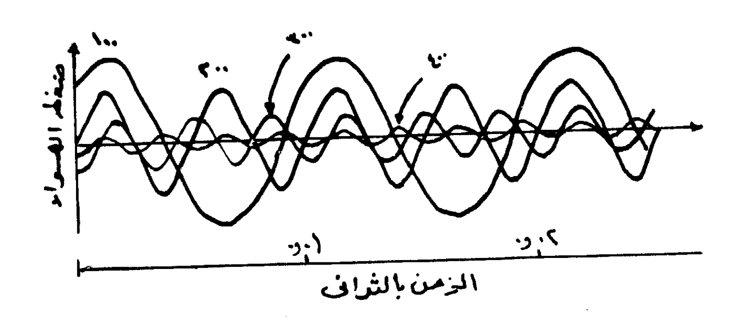
حينما يكرر شكل موجى نفسه عدة مرات،فكل تكراره كاملة تسمى دورة .وبذلك تكون الدورة هى ذلك الجزء من الموجة بين أى نقطـــة (على سبيل المثال النقطة (أ) فى الشكل ت ـ١) والنقطة التاليـة (ذات الرمز ب) حيث تبدأ تغيرات ضغط الهواء فى عمل نفس سلسلـــة التغيرات بدقة مرة أخرى .

الاضمحلال : damping

هو الذى يسبب زوال الاهتزازات أو التغيرات فى ضغط الهـــواء. والصوت المضمحل اضمحلالا سريعا (أى الصوت الذى يزول بسرعـــــة) تكون طاقته موزعة على نطاق واسع من مكونات التردد. والشكل(ت ـ٤) يبين الشكل الموجى ،والشكل (ت ـ ٥) يبين طيف مثل ذلك الصوت.



شكل (ت ـ ١) موجة مركبـــــــــــــــة



شكل (ت -٢) ترددات المكونات للموجة المركبة فى الشكل (ت -١) .

<u>الديسبل</u> : decibel

مقياس مفيد لمقارنة القدرة (وبالتالى . تقريبا - العلو) بين صوتين . والفرق بالديسبل بين صوتين يساوى ١٠ مرات اللوغاريتم المعتاد للنسبة بين قدرتى الصوتين .

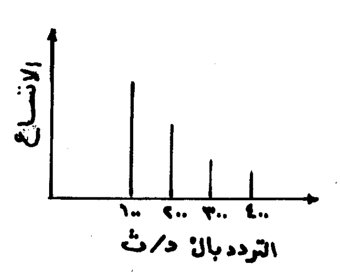
<u>التردد</u>: frequency

هو عدد الدورات الكاملة التى تحدث فى ثانية واحدة . فالشوكة الرنانة التى ترسل نغمة كونسرت Concert ذات درجة (a) ، تصنع ٤٤٠ حركة خلفية وأمامية كاملة فى الثانية ؛فترددها إذن هو ٤٤٠ دورة فى الثانية (د/ث) . وتردد الموجة المركبة المبينة فى شكل (ت - ١) هو ١٠٠ د/ث طالما أن كل دورة (من أ الى ب مثلا) تستغرق $\frac{١}{١٠٠}$ من الثانية ،والتغير فى تردد الشكل الموجى يكون عادة مصحوبا بتغير فى درجة الصوت .

<u>المكون الترددى</u> : frequency component

هى واحدة من عدد من الموجات الجيبية والتى يمكن أن نفترض وجودها فى موجة مركبة . فلو افترضنا أن الموجة الموضحة بالشكل

(ت - ١) قد استمرت إلى مالا نهاية ،لأمكننا القول أنها مكونة من المكونات الترددية الأربعة المبينة بالشكل (ت - ٢) ٠



شكل(ت - ٣) طيف الموجة المركبة فى شكل (ت - ١)٠

التردد الأساسى : fundamental frequency

هو التردد لتكرار موجة مركبة (أى ١٠٠ د/ث شكل ت - ١)، فحين يحلل شكل موجى تكرارى إلى مكونات تردده ،فإن الأساسية هى أعلى عامل مشترك لمكونات التردد. فالمكونة ذات هذا التردد(وهو ١٠٠ د/ث للموجة التى بالشكل ت -٢) قد يكون لها سعة كبيرة ،أوربما كانت (فى تحليل لاشكال موجية أخرى) ذات سعة صغيرة ،أو (كما فى حالة الموجة فى شكل ٦ -٣) قد لايكون هناك أى مكون بهذا التردد.

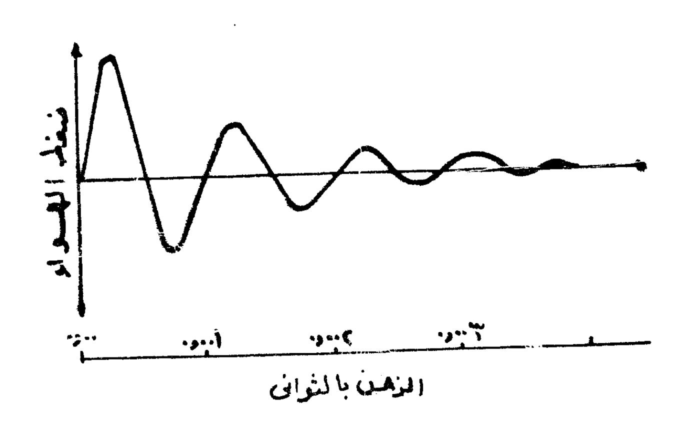
التردد القاعدى : basic frequency

أهم مكون للتردد،وهو عادة ذلك الذى له أكبر سعة ؛فالشكل الموجى المبين فى شكل (ت - ٤) له تردد قاعدى ذو ١٠٠٠ د/ث (ولأنها نموذج لاتكرارى فلا يمكن أن يقال أن لها تردد أساسى)٠

التوافقية : harmonic

هى المضاعفات الصحيحة للتردد الأساسى للشكل الموجى. فإذا كان

الشكل الموجى المركب ذا تردد أساسى قدره ٢٠٠ د/ث ،فإن المكونات التى ترددها ٤٠٠ د/ث ،٦٠٠ د/ث تسمَّى عادة بالتوافقية الثانيـــة والتوافقية الثالثة . والصوت الموضح بالأشكال (ت ـ١) ،(ت ـ٢) ، (ت ـ ٣) يتكون من الأساسية والتوافقية الثانيةوالثالثةوالرابعة . وكل باقى التوافقيات مهملة .



شكل (ت ـ ٤) موجـــة مضمحلـــــــة

العلــــــو : loudness

هو الخاصية السمعية لصوت ما والتى تُمَكِّن المستمع من وضـــع الصوت على مقياس يبدأ من خافت إلى عالٍ ، بدون اعتبار للخـــواص الأكوستيكية (أو الفيزيقية) للصوت .

الدرجـــة : pitch

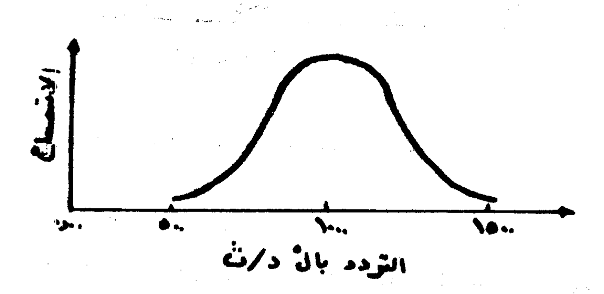
هى الخاصية السميعة للصوت التى تمكن المستمع أن يضع الصوت على مقياس يبدأ من منخفض إلى مرتفع بدون اعتبار للخواص الأكوستيكية (أو الفيزيقية) للصوت .

القــــدرة : power

قدرة صوت ما تتناسب مع مربع جذر متوسط مربعات السعة .لذلـك إذا تضاعف جذر متوسط مربعات سعة ما بمقدار ثلاثة أمثال فــإن القدرة تزداد بعامل قدره : $٣^٢$ أى = ٩ .

الرنيـــن : resonance

هو ظاهرة توجد حيث يكون للجسم ميل طبيعى لأن يهتز عند تردد معين ، لذلك نراه يُحْدِث اهتزازات ذات سعة كبيرة نسبيا حينمـا يُطْلَقُ فى الحركة بواسطة جسم آخر يهتز بنفس التردد. وسعــة الاهتزازات القسريــة تزداد حينما تصبح ترددات الجسم المسبب للاهتزاز أكثر قربا من التردد الطبيعى للمرنان [وهو الجسم المهتز عن طريق تأثره باهتزاز جسم آخر].

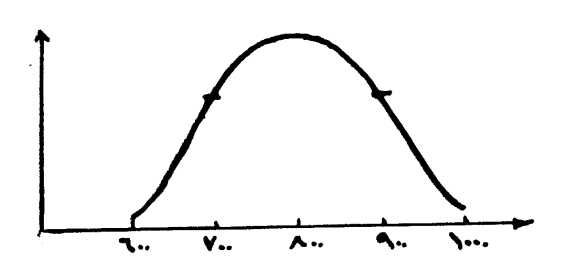


شكل (ت ــ ٥) طيف للشكل الموجى اللاتكــرارى الموضح بالشكل رقم (ت ــ ٤) .

منحنى الرنيـــن : resonance curve

هو توضيح للسعات النسبية للاهتزازات التى يجب أن يحدثهــا جسم استجابةً للترددات المحركة المختلفة . وبذلك فإن شكل (ت ــ ٦) هو منحنى الرنين لجسم (والذى قد يكون كتلة من الهواء مُحْتازَةً فى أنبوبة شبيهة بالممر الصوتى) حيث يحب عليه أن يستجيب أفضــل

استجابة لنغمة قدرها ٨٠٠ د/ث ،كما يستجيب نصف استجابة لترددات ذات ٧٠٠ ، ٩٠٠ د/ث . وحينما يستجيب جسم لنطاق واسع من الترددات يقال إنه مرنان مضحل .



شكل (ت - ٦) منحنى يحدد خصائص مرنـــان .

موجـــة جيبيـــــة : sine wave

هى واحدة من أبسط أشكال التغيرات المنتظمة (فى ضغط الهواء) والنغمة النقية يكون لها شكل موجى له شكل المنحنى الجيبى.

جيبـــى الشكـــــل : sinusoidal

له شكل الموجة الجيبيـــة .

الطيـــــــف : spectrum

هو رسم بيانى يوضح النسبة بين السعات لمكونات تردد صوت ما . فإذا استمر الشكل الموجى المبين بالشكل (ت -١) إلى مالانهايـــة ، فإن الصوت يكون له أربع مكونات فقط،ويكون طيفه طيفا خطيـــــا (خط واحد لكل مكون) كما هو موضح بالشكل (ت - ٣) . والشكـــــل الموجى اللاتكرارى مثل الموجة المضمحلة فى شكل (ت - ٤) لها عدد لانهائى من المكونات فى طيفها المبين بالشكل (ت - ٥) وهذا النوع

من الطيف يسمى الطيف المستمر.

الضجيج أو الضوضاء : white noise

وهو صوت ذو كمية متساوية من القدرة عند كل مكون ترددى فى نطاق السمع الممكن .

٢- المراجع مع وصف موجـــــز

ملاحظة : هذه المراجع روجعت فى عام ١٩٧١

هناك كتابان تقليديان يجب أن يقرأهما كل دارس لعلم الأصوات الأكوستيكى :

1- M.Joos, Acoustic phonetics (Language, Mongraph No. 23, Supplement to Language Vol. 24, No. 2, 1948).

2- R.K. Potter, G. Kopp, And H. Green, Visible Speech (New York, 1947).

أول هذين الكتابين يبدأ بعلاج مكثف لمعظم الموضوعات التـــى فى الكتاب الحالى ، ثم يستمر بعدئذ لكى يمدنابدراسة طيبـــة للمعلومات الصوتية العامة . ومن حسن الحظ فإن المناقشات النظرية قد عنونت بوضوح بأنها نظرية ،حتى يمكون تصحيحها حيثما تدعـــو الضرورة إلى ذلك .

أما الكتاب الثانى ــ الأحدث ــ فهو ذو طابع بسيط وموجـــه للتطبيقات العملية ،خاصة لخدمة الصُم .وهو يتضمن كمية طيبة مـــن المادة النافعة مختلطة ببعض الأمور التى تثير الارتباك ،فعلاجـــه للأصوات المنعزلة ذو خطورة بسبب صناعية الأصوات المأخوذة كعينات (وعلى سبيل المثال الصوائت الانجليزية المرفقةclear الثابتة بدلا من الصوائت العادية الصعبة المركبة diphthongized ..الخ) وتصحيح هذا الكتاب من الصعوبة بحيث أنه يحتاج لأن يقرأ بحـــذر شديـــد .

والكثير من المادة الأخرى التى تهمنا موجودة فى الدوريـــات خاصة :

The Journal of the Acoustical Society of America.

وبعض صفحات هذه الدوريات وغيرها قد جمعت فى :

3- Ilse Lehiste, ed., Readings in Acoustic phonetics (Cambridge, Mass,:M.I.T. Press 1967.)

ومازال أكثر الدراسات الصوتية للكلام أهمية هو :

4- G. Fant, Acoustic Theory of Speech production (The Hague: Mouton,1960).

فهذا الكتاب هو بلا شك العمل الرائد فى الميدان. ففيه كمية طيبة من المعالجات الرياضية المفصلة للخواص الصوتية للممر الصوتى ، ولكن معظم الكتاب يمكن قراءته والاستفادة به بواسطة كل دارسى الكلام.

ولقد كتب فانت Fant كتبا أخرى كثيرة ومقالات ،بعضها مدرج فى المرجع رقم ٣ السابق . وأمانظرته الأكثر عمقا فى حقل علم الأصوات الأكوستيكى فنجدها فى :

5- B.Malberg,ed.,Manual of Phonetics (Amesterdam: North Holland,1968).

فهذا الكتاب يحتوى أيضا على عدد آخر من المقالات القيمة عن علم الأصوات التجريبى :

experimental phonetics

وأفضل كتاب كمدخل يحتوى على مادة علم الأصوات الأكوستيكى هو:

6- P.B.Denes and E.N.Pinson,The Speech Chain: The Physics and Biology of Spoken Language (Bell Telephone Laboratories,1963)

والكتب الاخرى الهامة (مرتبة بنظام الابجدية) تتضمن :

7- W.A.Van Bergeijk, J.R.Pierce,and E.E. David, Waves and the Ear (London, Heinemann, 1961).

وهو دراسة مبدئية جيدة للطبيعة الفيزيقية للصوت وفسيولوجيا الأذن.

8- R.Chiba and M.Kajiyama, The vowel : Its Nature and Structure (Tokyo: Phonetic Society of Japan, 1941; reprinted by offset lithography with new title page and Typographical errors corrected 1958).

وبالرغم من قدمه، فسوف يظل هذا الكتاب مصدرا رئيسيا للمعلومات الصوتية والفسيولوجية عن الصوائت.

9- G.Fant, Acoustic Analysis and Synthesis of Speech, with Application to Swedish" (Ericson Thechnics, Vol.1, 1959, reprinted 1969).

وهذا العمل يعتبر فنيا بدرجة لا بأس بها، ولكنه يحتوى على كمية ضخمة من المعلومات النافعة.

10- J.L. Flangan, Speech Analysis, Synthesis and perception (New York: Academic Press 1965).

وهو مراجعة فنية للعمل الحديث ومكتوب إلى حد كبير من وجهة نظر المهندسين.

11- H.L.F.Helmholtz, Sensations of Tone, translated by A.J. Ellis (New York: Dover Publications, 2n. ed., 1885, reprinted 1954).

وهو ذو أهمية عظيمة لكل من يهتم بتاريخ علم الأصوات، .. والترجمة قام بها واحد من رواد علم الأصوات حاليا، وفيها ملاحظات إضافية عديدة كما زودت بالملحقات.

12- Peter Ladefoged, Three Areas of Experimental phonetics (London, Oxford University Press, 1967).

وهو دراسة مركزة للاعمال المبكرة ،كما يتضمن فصلا طويلا عن البارامترات السمعية والأكوستيكية لنوع الصائت.

13- Peter Ladefoged, A phonetic Study of West African Languages (Cambridge : Cambridge University Press, 1964).

ويتضمن أمثلة لاستعمال فنون الأجهزة المعملية على نطاق واسع لتساعد فى إقامة الوصف اللغوى .

14- Ilse Lehiste, Suprasegmentals (Cambridge, Mass,:M.I.T.Press,1970).

وهذا الكتاب يمدنا بأمثلة ممتازة ومتعددة الاستخدام فى علم الأصوات الأكوستيكى لجمع المعلومات الهامة لغويا .

٣- المعجـــــــم

-A-

abrupt	مفاجـــئ
acoustic filter	مرشح اكوستيكى
action	عمـــــل
air body	كتلة هـــواء
amplitude	اتساع - سعـــة
amplitud ratios	نسب الاتساعات
analysis	تحليـــــــل
apparent	ظاهــــــرى
appendixcs	ملحقـــــات
appropriate	ملائـــــــم
approximately	تقريبـــــا
articulators	أعضاء النطـــق
artificial synthesizer	مخلق صناعى (للصوت)
atmosphere	الجـــــــو
auditory nerves	أعصاب السمـــع

-B-

bandwidth	حزام الطيـــف
basic	قاعـــــدى
bass	باص (درجة موسيقية غليظة) بعد do الوسطى على يسار البيان
[illegible]	غير واضـــــح

bob	ثقل البندول
body	جسم ـ كتلة
breath	نَفَس

- C -

calibrated	مقسم ـ مدرج (للمقاييس)
cathod	الكاثود (قطب كهرباڤى يبعث أشعة معينة)
cavities	فجوات
clear	مرقق
closure	اغلاق
cockney	اسم طائفة من طوائف الشعب الانجليزى
complex	مركب
complex form	نموذج مركب ـ شكل مركب
complex wave	موجة مركبة
component	مُكَوِّن (بكسر الواو)
composite	مركب
compression	ضغط
consecutive	متتالى ـ متتابع
consert (a)	كونسرت (a)
consonant	صامت (فونيم)
constriction	تضييق
contained	محتاز (موجود فى حيز ما)
continuous	مستمر

continuous spectrum	طيف مستمـــــر
cross sectional area	مساحة المقطع

- D -

damped	مضمحـــــل
data	معلومات ـ بيانات
decay	اضمحـــــلال
decibel	الديسيل (وحدة لمقارنة القدرة بين صوتين)
derived	مستنبط ـ مشتـق
differentiate	يميـــــز
difference of phase	فرق الطـــور
displaced	أُزيح ـ أُبعــــد
diverse	متعـــــدد
dominant	سائــــــــد
double bass	صوت شديد الغلـظـة
drop	سقوط ـ هبـــوط
drum	اسطوانة ـ طبلـــة
dull - thud	صوت مكتـــــوم
duration	استمرار

- E -

ear drum	طبلة الأذن
effective frequency range	مدى التردد الكفء
efficiency	كفـــــاءة

elapsed	استغـــرق
elasticity	مرونـــــة
electro - chemical	كهروكيمائى
element	عنصــــــر
energy	طاقـــــة
equating	يعـادل (بين مقدارين)
equation	معـادلـــــة
experience	خبرة ـ يَخْبُـــرُ
experiment	تجربـــــــة

- F -

feature-s	ملـمح ـ ملامـــح
filter	مرشـــــــح
filtering action	تـأثير ترشيحـى
flat curve	منحنى منبسط
flatter	أكثر انبسـاطـا
flicking	يـطرق بخفـــة
fluctuations	تغيـــــرات
form	نموذج ـ شكــل
formant	حزمـــــــة
frequency	تـــــردد
frequency component	مُكَوِّنة التردد(بكسر الـواو)
front teeth	الأسنـان الأمـاميــة
fundamental	أسـاســـى

- G -

generate	يولّد
glottal stop	وقفة حنجرية مثل صوت الهمزة
glottis	فتحة المزمار
group	مجموعة

- H -

harmonic	توافقى
harp	هارب (آلة موسيقية غربية)
heavily damped	مضمحل اضمحلالا شديدا
high pitch	درجة مرتفعة
hissing	هسيس (له صوت السين)
horysontal scale	مقياس أفقى

- I -

inner ear	الأذن الداخلية
instantaneously	لحظيا
intermidiate volues	قيم بينيه (أى قيم تقع بين قيم أخرى)
input	مُدْخَل
irregular	غير منتظم - غير مطرد

- I -

larynx	الحنجرة
lateral	صوت جانبى مثل الصوت (ل)

letter	حرف (وهو الرمز الكتابى للفونيم)
limit - S	حد ـ حـــدود
lightly damped	مضمحل اضمحلالا خفيفا
logarithmic	لوغاريتمـــى
loudness	علـــو
loud sound	صوت عـال
loud speaker	ميكروفـون
lungs	رئتيـــن

- M -

masking	طمس (إخفـــاء)
maximum	نهاية عظمى ـ أقصى
mechanism	آليـــات
mel scale	مقياس مل
middel C	" C " المتوسطة وهى نفسها النغمة do الوسطـى أى التى فى وســط البيان
minimum	نهاية صغرى ـ أدنى
mode	نمـــط
modified	تعـــدل
multiple	مضاعفات عـدد

- N -

nasal sound	صوت أنفـــى
non-repetetive	لاتكــــرارى

normal pressure	الضغط العادى
note	نغمــــــة
note (A)	النغمة (A) وهى نفسها النغمة La على السلم الموسيقى (= ٤٤٠ د /ث)
note (C'')	النغمة C'' هى النغمة do على السلم الموسيقى(=١٠٤٦د/ث) على يمين البيان بعد do الوسطى

- O -

octave	النغمة الثامنة بالنسبة لنغمة ما ،وتعتبر جواب هذه النغمة
output	المُخْرَج

- P -

pattern	نموذج ـ شكل
perceived pitch	الدرجة المدركة
period	فتــــرة
phase	مرحلــة ـ طور
phenomina	ظواهر (جمع)
phenominon	ظاهرة (مفرد)
phonetics	علم الأصوات الكلامية
pitch sensation	الإحساس بالدرجة
point	سن (سـن قلم مثلا)
power	قدرة

- Q -

quality	نوعيـة - (طابع)

- R -

rarefaction	تخلخل - تفريغ
randum	عشوائـــى
rate	معـــدل
recur	تتابـــع
refrence level	مستوى المقارنة - المستوى المرجعى
regular	منتظم - مطرد
relative amplitudes	الاتساعات النسبية
r.m.s (root mean square)	ج.م.م.(جذر متوسط مربعات)
resonance	رنين
resonant	مُرِنّ(بضم الميم وكسر الراء)
resonant frequency	التردد المُرِنّ
resonate	يَـرِنّ(بضم الياء وكسر الراء)
resonator - s	مرنان - مرانيـن
resound	تَـــرِنّ
resultant	محصلـــة
repetetive	تكـرارى
respiratory muscles	عضلات التنفس
ripples	مويجات (تصغير موجة)
rustling	صوت مثل صوت الأوراق الجافة

- S -

scale	مقيـــاس
screen	شاشة (للتليفزيون أو السينما)
semi randum	شبه عشوائـــى
senthesize	يُخلّق (برفع اليـاء وكسر اللام)
series	سلسلة ـ متوالية
shape	شكـــل
sharpness	شـدة التحدب
simaltaneously	فى نفس الوقت
sine wave	منحنى جيبـــى
sinusoidal	جَيْبِىّ الشكل ـ ذو شكل جيبى
size	حجـــم
smooth	انسيابـــى
soft palate	الجزء اللين من سقف الفم
soft sound	صوت خفـــى أو خافت
sounding board	لوحة لتكبير الصوت فى البيان
sound spectrograph	راسم الطيف الصوتى
spectra	أطياف (جمع)
speech	كـــلام
speech sound	صوت كلامـــى
spectrogram	رسم طيفـــى
spectragraph	راسم الطيف
spectrum	طيف (واحد)

standered pitch	درجة قياسيـــة
stationry	ساكـن
steady	ثابت ـ مستقـر
step	سلمـة ـ درج
stiff	صلـــب
stiffness	صلابـــة
stimulate	يثيـــر
strike	يطرق ـ يضرب
superimposed	أضيفت من أعلـــى
surface	سطـــح
swinging	يتأرجـــح
a swing	أرجحـــة

- T -

tangible	ملموس
tap	دفقـة (صوت السائل حين يتدفق من الزجاجة على دفعات)
tention	توتـر ـ شـد
threshold	العتبـــة
threshold of pain	العتبة الحسية للألم
throat	القصبة الهوائية ـ الزور
time constant	ثابت الزمـن
tone	نغمـــة
transient	عابـــر
treble	تربل (ثلاث مرات)

tuning fork	شوكة رنانــــة
type	نمط ـ نمــوذج

- V -

value	قيمــــــة
vase	أصيص (زهريــة)
vertical scale	مقياس رأســى
vibrate	يهتـــز
visual inspection	فحص بصــرى
vocal chords	الوتران الصوتيان ـ أو الأوتار الصوتية
vocal organs	أعضاء النطق
vocal tract	الممر الصوتــى
vowel -s	صائت ـ صوائت

- W -

wave	موجـــــة
wave analysis	التحليل الموجــى
wave form	شكل موجى ـ نموذج موجى ـ صورة موجية
wave front	جبهة الموجة
wave motion	الحركة الموجية
wave shape	شكل موجــــــى
white noise	الضجة البيضاء ـ الضوضاء البيضاء
whole nomber	عدد صحيـــح .